

# 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	電気通信大学大学院 情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 博士前期課程		
氏 名	塚本 寛也	学籍番号	1331068
論 文 題 目	基板裏面開口による超広帯域平面アンテナの研究		
<p>要 旨</p> <p>近年、ICT（Information and Communications Technology）の発展に伴い、無線通信の研究が盛んに行われている。特に、近年の無線通信端末は複数の周波数帯を用いて通信を行う機器が多い。そのため、複数の周波数帯を包含する広帯域アンテナが望まれている。さらに、通信デバイスの小型化も著しく、小型・軽量で広帯域なアンテナが強く望まれている。</p> <p>平面、小型、超広帯域、安定した利得特性を有するアンテナとして、基板裏面開口による超広帯域アンテナが提案されている。このアンテナはマイクロストリップパッチアンテナの裏面導体を一部除去し、表面パッチ部と開口したグランド導体との間に適度な結合を持たせることにより、数オクターブの超広帯域特性を実現した。しかし、このアンテナの超広帯域動作原理は、まだ十分に解明するに至っていない。</p> <p>本研究の目的は、本アンテナの動作原理の解明である。アンテナの構造パラメータを変化させ、シミュレーションを繰り返すパラメータスタディを行うことにより、各パラメータがアンテナ特性に与える影響を明確にした。また、アンテナパッチ及び裏面開口したグランド導体における電流分布を解析し、アンテナ放射パターン・利得特性との関連を明らかにした。さらに、アンテナの等価回路モデルを立て、アンテナ構造パラメータとの関連付けを行った。これらの結果より、アンテナの反射特性の谷とアンテナ寸法との規則性、アンテナ動作周波数の下限と上限を規定する要因など、アンテナの特性及び動作原理に一定の解釈を与えることが出来た。等価回路モデルにより本アンテナの広帯域動作原理の一部であるアンテナの共振条件および結合条件について部分的に解明した。また、先行研究では検証されていなかったグランド面積に関する考察を行い、広帯域特性とアンテナの開口構造との依存性を明らかにした。本アンテナは平面、小型、超広帯域、安定した利得特性といった優れた特性を持っているので、本アンテナの動作原理の解明は大変有意義である。</p>			

電気通信大学 情報理工学研究科 情報・通信工学専攻

2014 年度 修士論文

# 基板裏面開口による 超広帯域平面アンテナの研究

情報・通信工学専攻  
電子情報システムコース  
矢加部研究室

学籍番号：1331068

氏 名：塚本 寛也

指導教員： 矢加部 利幸 准教授  
肖 鳳超 准教授

提出日： 2015 年 1 月 30 日

第 1 章	はじめに	3
第 2 章	アンテナ構造と解析手法	
2.1	基板裏面開口による超広帯域平面アンテナ	5
2.2	パラメータスタディ手法	8
2.3	電磁界シミュレーションについて	9
第 3 章	解析結果と考察	
3.1	パラメータスタディ結果	11
3.1.1	$W_g$ の効果	13
3.1.2	$L$ の効果	19
3.1.3	$W$ の効果	25
3.1.4	$g$ の効果	30
3.1.5	$d$ の効果	35
3.1.6	基板の面積の効果	40
3.1.7	基板の比誘電率の効果	49
3.2	放射パターン	54
3.3	電流密度分布	58
3.4	アンテナの入力インピーダンス	64
第 4 章	アンテナの等価回路モデルと考察	
4.1	アンテナの等価回路モデル	67
4.2	アンテナの上限周波数と下限周波数	69
	まとめ	70
	参考文献	71
	謝辞	73

# 第 1 章

## はじめに

近年，ICT（Information and Communications Technology）の発展に伴い，無線通信の研究が盛んに行われている．特に，近年の無線通信端末は複数の周波数帯を用いて通信を行う機器が多い．そのため，複数の周波数帯を包含する広帯域アンテナが望まれている．さらに，通信デバイスの小型化も著しく，小型・軽量で広帯域なアンテナが強く望まれている．従来の研究では，対数周期アンテナ[1]，バイコニカルアンテナ[2]，広帯域モノポールアンテナの一つであるボルケーノスモークアンテナ[3]などが提案されているが，その構造は立体構造かつ大型である．そのため，小型・平面構造のアンテナも提案されている[4]~[9]．例として，自己補対アンテナ[5][6]，広帯域モノポールアンテナを誘電体基板上に形成したアンテナ[7][8]，板状ループアンテナ[9]などがある．

平面，小型，超広帯域，安定した利得特性を有するアンテナとして，基板裏面開口による超広帯域アンテナが筆者らにより提案されている[10]~[13]．このアンテナはマイクロストリップパッチアンテナの裏面導体を一部除去し，表面パッチ部と開口したグランド導体との間に適度な結合を持たせることにより，数オクターブの超広帯域特性を実現した[10]~[13]．しかし，このアンテナの超広帯域動作原理は，まだ十分に解明するに至っていない．

本研究の目的は本アンテナの動作原理の解明である．これまでに得られた実験結果と大量の電磁界シミュレーション結果に基づき，アンテナの動作原理の解明を試みた．まず，アンテナの構造パラメータを変化させ，シミュレーションを繰り返すパラメータスタディを行うことにより，各パラメータがアンテナ特性に与える影響を明確にした．また，アンテナパッチ及び裏面開口したグラウンド導体における電流分布を解析し，アンテナ放射パターン・利得特性との関連を明らかにした．さらに，アンテナの等価回路モデルを立て，アンテナ構造パラメータとの関連付けを行った．これらの結果より，アンテナの反射特性の谷とアンテナ寸法との規則性，アンテナ動作周波数の下限と上限を規定する要因など，アンテナの特性及び動作原理に一定の解釈を与えることが出来た[12][13]．以下，それらの結果を報告する．

## 第 2 章

# アンテナ構造と解析手法

### 2.1 基板裏面開口による超広帯域平面アンテナ

マイクロ波アンテナとして、使用周波数の波長や生産効率性、無線通信機器の小型化などの観点から平面アンテナが広く用いられる。平面アンテナの一つに、マイクロストリップパッチアンテナ(MSA) がある。しかし、MSA は狭帯域であり、広帯域通信で用いるアンテナとしては適していない。なぜなら、MSA の狭帯域特性は表面パッチと裏面グランド導体により構成される共振器による電磁波の閉じ込めに起因するからである[10]。そこで、MSA の裏面グランド導体を部分的に除去し開口することにより、共振器による閉じ込めを弱め、アンテナの動作帯域を広帯域化させる方法が提案されている [10]~[13]。

本アンテナの構造を図 2.1.1 に示す。また、実際に試作したアンテナを図 2.1.2 に示す。アンテナは基板表面に給電線と直結したパッチ部と、パッチ部裏側のグランド導体を除去し開口した裏面窓部からなる。以前報告した研究結果から、表面パッチ部と低域帯から機能する裏面グランド導体との間に適度な結合を与えることにより、数オクターブの超広帯域にわたって動作することが分かっている[10]~[13]。このアンテナの一例として、シミュレーションと実測を併せた反射特性および利得特性を図 2.1.3, 2.1.4 に示す。ただし、利得特性はアンテナ正面方向の絶対利得である。この結果より、本アンテナが約 2.6 GHz から 11.8 GHz までの広い動作帯域（インピーダンス帯域）と、ほぼ同じ帯域にわたり安定した利得特性を有することが分かる。このアンテナの寸法を、表 2.1.1 に纏めた（ただし、図 2.1.3, 2.1.4 の実測値は  $g$  が約 1.2 mm のもの）。表 2.1.1 の寸法は、特に断らない限り、以下のパラメータスタディの基準パラメータとする。また、基準パラメータを用いたアンテナを本稿では基準アンテナと呼ぶ。

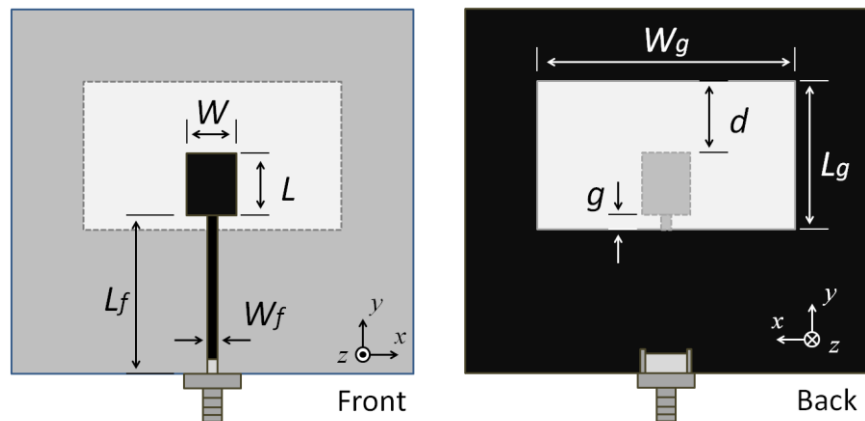


図 2.1.1 アンテナの構造と寸法

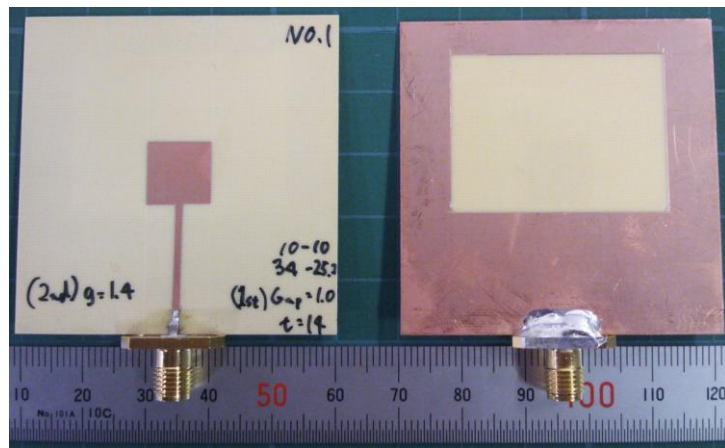


図 2.1.2 試作アンテナの例

表 2.1.1 基準アンテナパラメータ

誘電体基板：	比誘電率： $\epsilon_r = 3.5$
Panasonic 社製	基板厚み： $H = 0.5 \text{ mm}$
MEGTRON6	銅箔厚み： $T = 18 \text{ }\mu\text{m}$
型番：R-5775	誘電正接： $\tan \delta = 0.004$
	アンテナ面積： $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$
表面パッチ部	$W = 10.0 \text{ mm}$ , $L = 10.0 \text{ mm}$
給電線部( $50 \text{ }\Omega$ )	$W_f = 1.2 \text{ mm}$ , $L_f = 25.0 \text{ mm}$
裏面開口部	$W_g = 34.0 \text{ mm}$ , $L_g = 24.8 \text{ mm}$
	$g = 0.8 \text{ mm}$ , $d = 14.0 \text{ mm}$

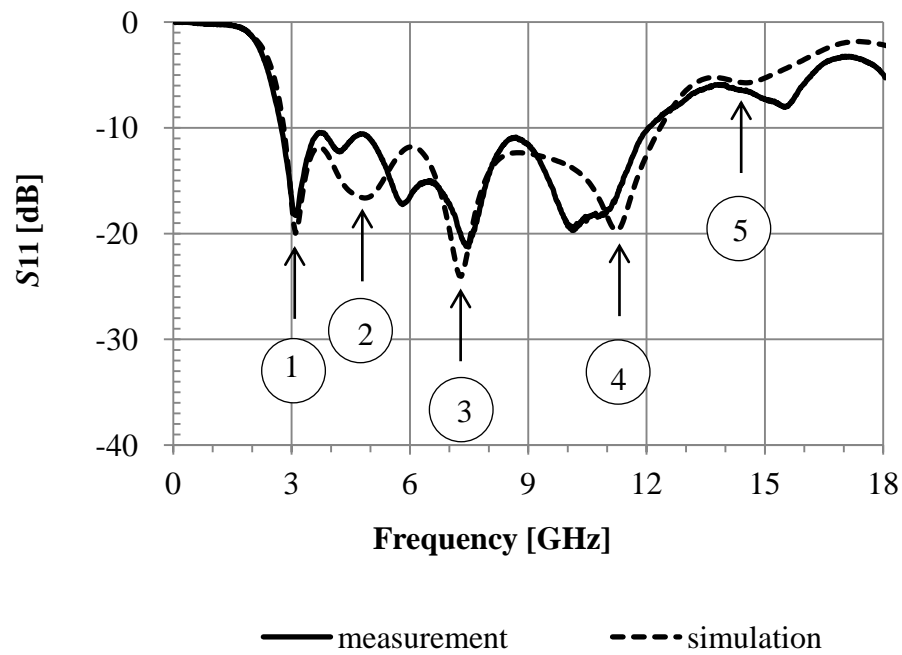


図 2.1.3 基準アンテナの反射特性

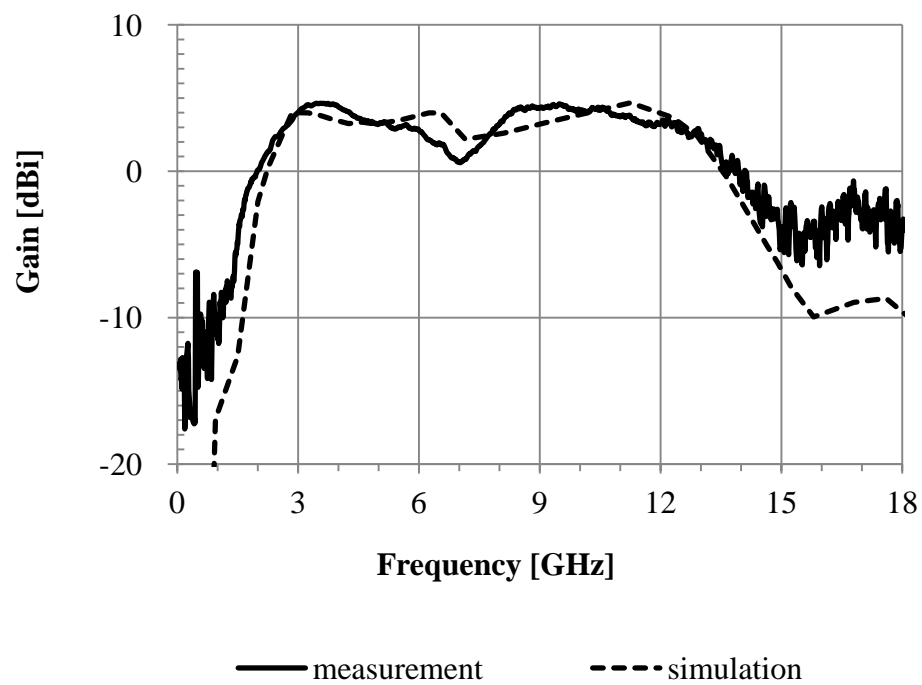


図 2.1.4 基準アンテナの利得特性



## 2.2 パラメータスタディ手法

パラメータスタディは、表 2.1.1 に示した基準パラメータをベースに、図 2.1.1 に示す $(W, L, g, d, W_g)$ の 5 つのパラメータ値を変えてそれぞれ行った。また、基板のパラメータ（面積・比誘電率）のパラメータスタディも同様に行った。パラメータを 1 つだけ変化させた時のアンテナ構造の変化の様子を図 2.2.1 に示す。なお、図 2.2.1 は $W_g$ の変化である。パラメータスタディによって得られた各パラメータの影響を等価回路モデルに併せて一定の解釈を行った。

パラメータスタディでは、反射特性が極小値（谷）となる周波数の推移に注目した。なぜなら、反射特性の谷は共振器が 1/4 波長の整数倍で機能している可能性があるためである。図 2.1.3 に示す基準アンテナの反射特性の計算値には 0~18 GHz の間に 5 つの谷があり低域側の谷から第 1~5 の谷とする。図 2.1.3 中の矢印は第 1~5 の谷を指す。

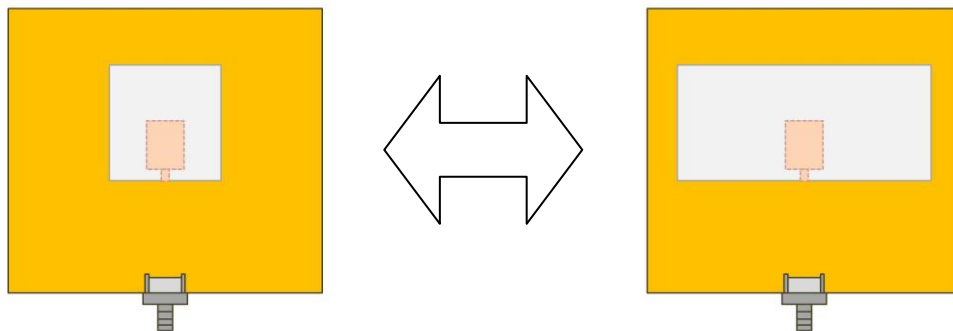


図 2.2.1 パラメータスタディの例 ( $W_g$  の変化)

## 2.3 電磁界シミュレーションについて

電磁界シミュレーションは、モーメント法のシミュレータ (IE3D, Zeland 社) を用いて行った。また、シミュレーションには、グラウンド面を有限として計算する方法と、無限として計算する方法がある。本研究では、グラウンド面を有限とした計算を「有限グラウンド計算」、無限の場合を「無限グラウンド計算」と呼ぶ。有限グラウンド計算は、表面と裏面の導体パターンの電流密度分布より特性を算出する。無限グラウンド計算は裏面グラウンド導体を除去した開口部分の磁流密度分布と、表面導体の電流密度分布より特性を算出する。

有限グラウンド計算の利点は、試作した有限寸法の実在アンテナの実測値に近い結果が得られること。また、裏面グラウンド導体の電流密度分布が得られることである。一方、無限グラウンド計算の利点は特性が基板の面積に影響せず、また計算も速いことである。

無限グラウンド計算によってシミュレーションする場合のデザイン例を図 2.3.1 に、有限グラウンド計算の場合を図 2.3.2 にそれぞれ示す。無限グラウンド計算は、青色で示された導体部分の電流密度と、緑色で示されたグラウンド導体を除去した開口部分の磁流密度より特性を算出する。有限グラウンド計算はそれぞれの層（レイヤー）の青色と緑色で示された部分の電流密度より特性を算出する。

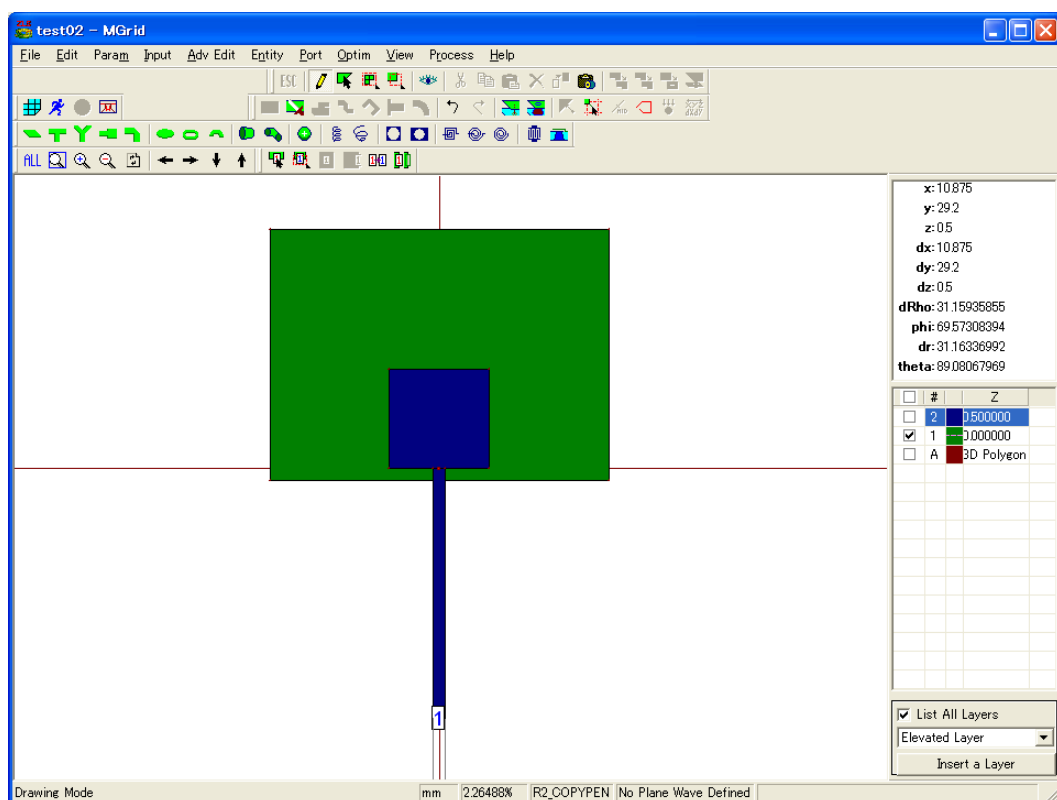


図 2.3.1 無限グランド計算のデザイン例

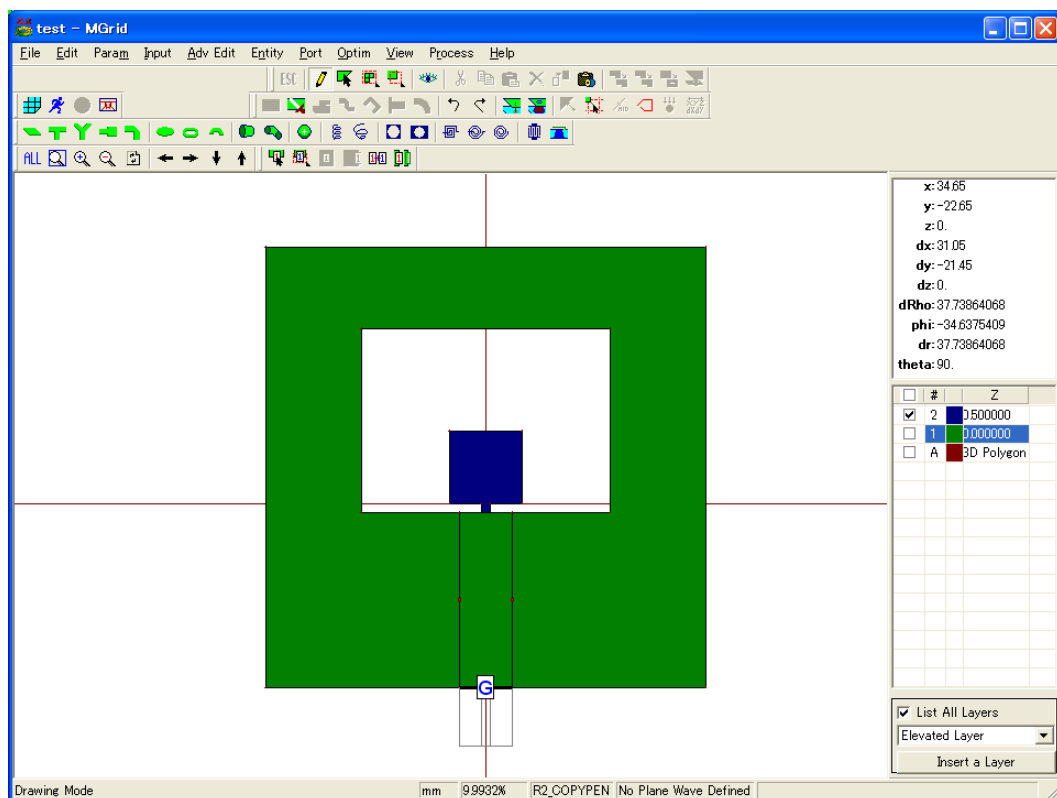


図 2.3.2 有限グランド計算のデザイン例

# 第 3 章

## 解析結果と考察

### 3.1 パラメータスタディ結果

寸法( $W, L, g, d, W_g$ )のパラメータスタディ結果を表 3.1.1 および項 3.1.1~3.1.5 に示す. また, 基板のパラメータ (面積・比誘電率) のシミュレーション結果を項 3.1.6, 3.1.7 に示す. なお, 反射特性および利得特性は周波数軸を対数表示している. これは, 各谷の周波数シフト量を適切に判断するためである. 各パラメータの効果をアンテナの等価回路における効果と関連づけた.  $W_g, L$  はアンテナのエレメント長としての機能,  $W, g$  は結合としての機能を主としていると考えられる (章 4 参照).

反射特性の各谷の特徴を表 3.1.2 に示す. 第 1 の谷では表面と裏面のエレメント同士が結合して 1 つのエレメントとして機能していることを示す結果が得られた. 第 3, 5 の谷では表面パッチがそれぞれ 1/4 波長, 半波長で機能している. 第 2, 4 の谷はエレメントの推定ができなかった. なぜなら, 第 2, 4 の谷では複数の谷が合併して一つの谷として見えている可能性があるためである. 第 1 の谷で表と裏が結合して一つのエレメント機能していることから, 本アンテナは「表面パッチ」, 「裏面グラウンド導体によるエレメント」および「表と裏が結合した一つのエレメント」の 3 つのエレメントが存在している. したがって, 第 2, 4 の谷は複数の谷が合併している可能性があり, また, この現象が本アンテナの解析を難しくしている.

表 3.1.1 アンテナパラメータスタディ結果

	効果
$W_g$	各谷の周波数（全体の帯域）がシフト. 第 1 の谷の波長と $W_g$ の変化は線形変化. アンテナエレメント長の一部分として機能.
$L$	第 1, 3, 4 の谷の周波数がシフト. 第 1 の谷の波長と $L$ の変化は線形変化. アンテナエレメント長の一部分として機能.
$W$	各谷の波長と $W$ が非線形的な変化. 主に表と裏の共振器間の結合として機能.
$g$	各谷の波長と $g$ が非線形的な変化. 表と裏の共振器間の結合として機能.
$d$	$d$ が小さくなると, 第 1 の谷の周波数が低域シフト.

表 3.1.2 各谷の考察

谷	周波数 [GHz]	考 察
1st	3.1	表面パッチと裏面エレメントが結合して 1 つのエレメントとして機能. $W_g$ と $L$ の変化と第 1 の谷の波長が線形変化したため. 表面パッチ上部から裏面窓の下部に渡って, 電流が分布. (図 3.3.1 (a) 参照)
2nd 4th	4.85 11.25	エレメントの推定できず. 図 2.1.3 の実測値に示すように 2 つの谷が合併している可能性.
3rd 5th	7.3 14.5	表面パッチ( $L = 10.0$ mm)による共振. 第 3 の谷の波長(1/4 波長): 9.4 mm, 第 5 の谷の波長(半波長): 10.2 mm 電流密度分布より第 3 の谷において, 表面パッチに半波長の電流分布.

### 3.1.1 $W_g$ の効果

$W_g$  のパラメータスタディの様子を図 3.1.1.1 に示す．無限グランド計算による  $W_g$  を 32~36 mm と変化させたときの反射特性および利得特性の変化を図 3.1.1.2, 3.1.1.3 に，有限グランド計算の場合を図 3.1.1.4, 3.1.1.5 を示す．反射特性の各谷の周波数を 1/4 波長，1/2 波長，1 波長に換算した数値と，そのときの  $W_g$  の寸法 (30~38 mm) との対応を表 3.1.1.1, 3.1.1.2 に示す．また， $W_g$  を 22~110 mm と広範囲に変化させたときの第 1 の谷に対応する波長の推移を図 3.1.1.6 に示す．そのときの  $W_g$  の変化の様子を図 3.1.1.7 に示す．

図 3.1.1.2~3.1.1.5 より  $W_g$  の変化により全体の帯域がシフトしている．これは  $W_g$  がすべての谷にエレメント長としての変化を寄与していることを意味する．図 3.1.1.6 に示すように， $W_g$  の変化と第 1 の谷の波長の変化が線形的な関係を持っている．すなわち，第 1 の谷を決定するエレメントが裏面窓の横幅寸法  $W_g$  に依存していることを表す．反射特性における第 1 の谷は，図 2.1.4 に示した利得特性とも対応しており，すなわち  $W_g$  は本アンテナの動作周波数の下限周波数を決定する重要なパラメータである．

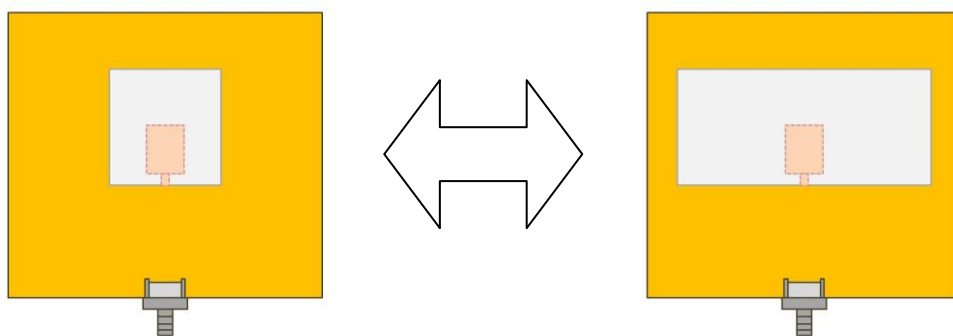


図 3.1.1.1 パラメータスタディ ( $W_g$  の変化)

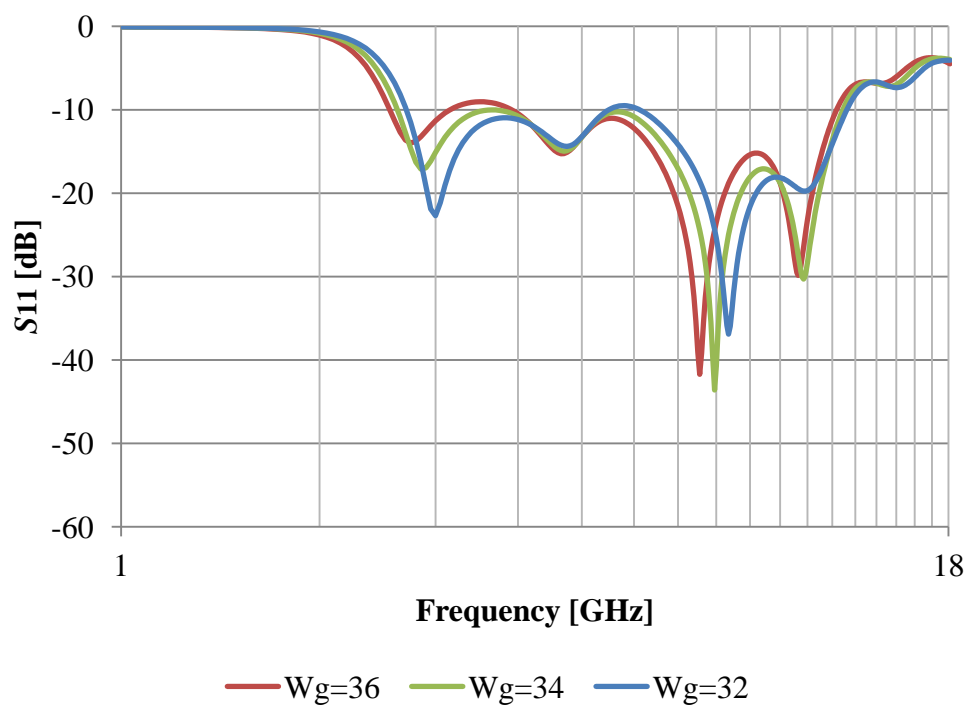


図 3.1.1.2 無限グランド計算による  $W_g$  のパラメータスタディ (反射特性)

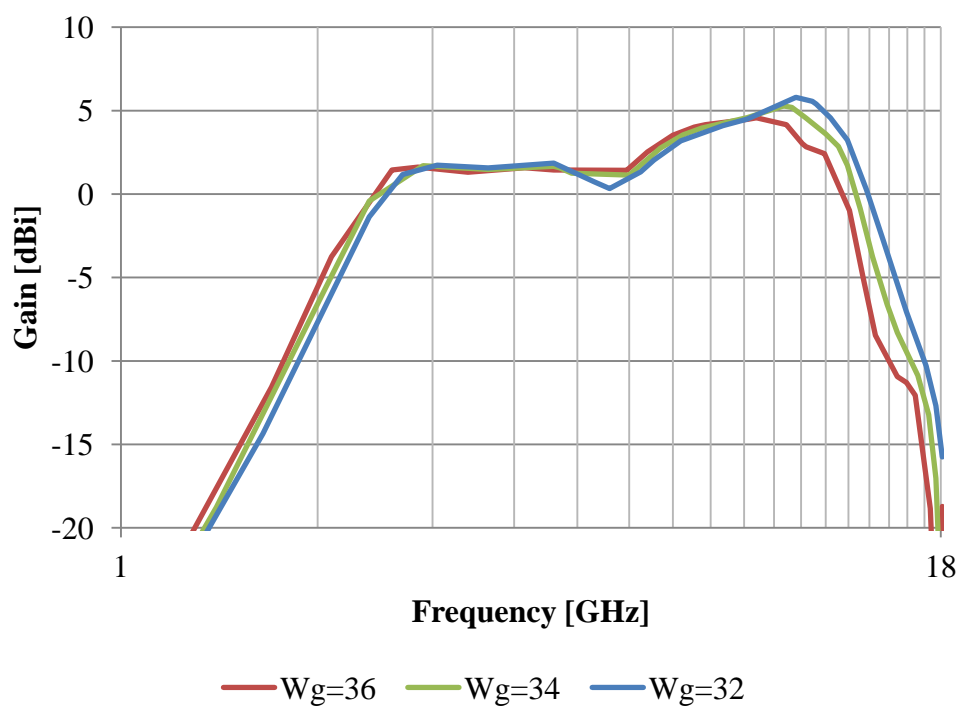


図 3.1.1.3 無限グランド計算による  $W_g$  のパラメータスタディ (利得特性)

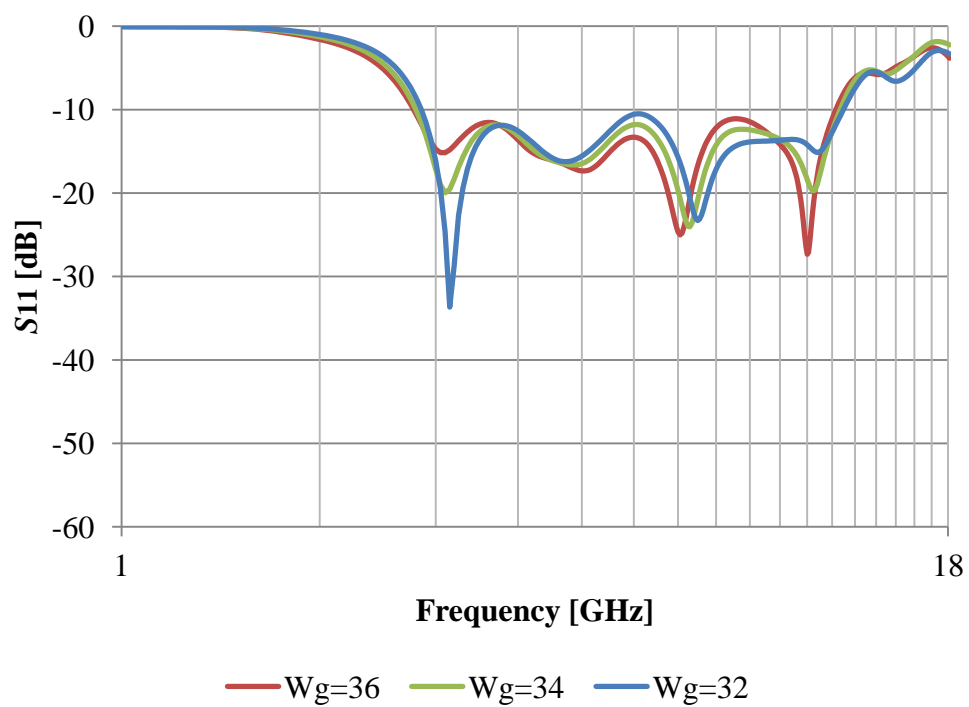


図 3.1.1.4 有限グランド計算による  $W_g$  のパラメータスタディ（反射特性）

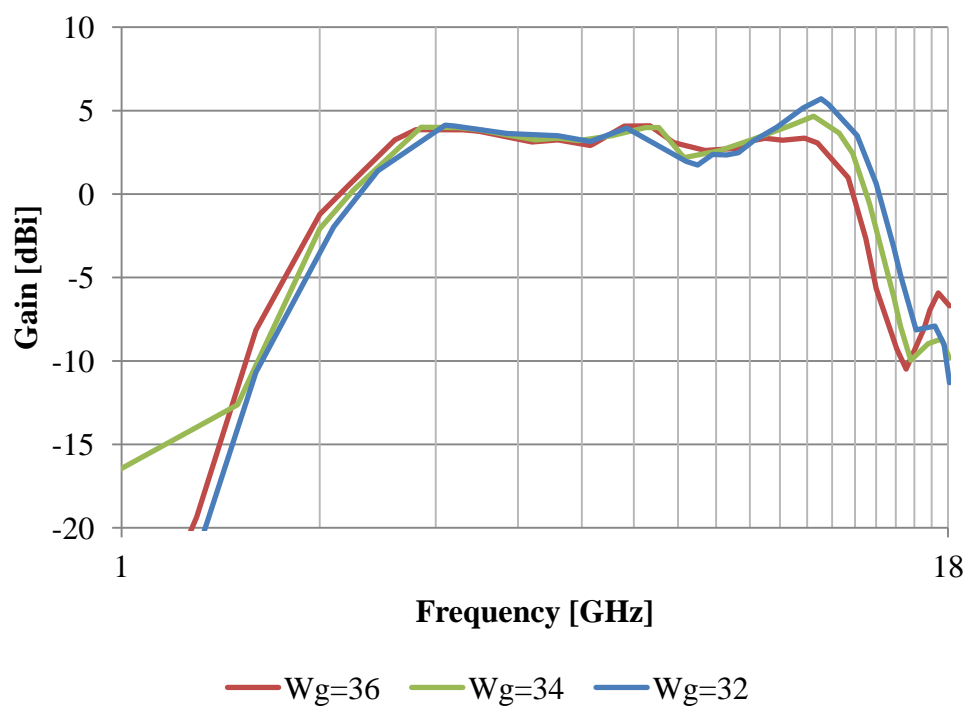


図 3.1.1.5 有限グランド計算による  $W_g$  のパラメータスタディ（利得特性）



表 3.1.1.1 各谷の周波数と対応する波長（無限グランド計算： $W_g$ ）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30	3.15	95.2	47.6	23.8
Wg=32	3	100.0	50.0	25.0
Wg=34	2.85	105.3	52.6	26.3
Wg=36	2.75	109.1	54.5	27.3
Wg=38	2.65	113.2	56.6	28.3
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30	4.8	62.5	31.3	15.6
Wg=32	4.75	63.2	31.6	15.8
Wg=34	4.7	63.8	31.9	16.0
Wg=36	4.65	64.5	32.3	16.1
Wg=38	4.65	64.5	32.3	16.1
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30	8.7	34.5	17.2	8.6
Wg=32	8.35	35.9	18.0	9.0
Wg=34	7.95	37.7	18.9	9.4
Wg=36	7.55	39.7	19.9	9.9
Wg=38	7.15	42.0	21.0	10.5
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30				
Wg=32	10.9	27.5	13.8	6.9
Wg=34	10.85	27.6	13.8	6.9
Wg=36	10.65	28.2	14.1	7.0
Wg=38	10.45	28.7	14.4	7.2
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30	15.55	19.3	9.6	4.8
Wg=32	15	20.0	10.0	5.0
Wg=34	14.65	20.5	10.2	5.1
Wg=36	14.2	21.1	10.6	5.3
Wg=38				

表 3.1.1.2 各谷の周波数と対応する波長（有限グランド計算： $W_g$ ）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30	3.25	92.3	46.2	23.1
Wg=32	3.15	95.2	47.6	23.8
Wg=34	3.1	96.8	48.4	24.2
Wg=36	3.1	96.8	48.4	24.2
Wg=38	3.05	98.4	49.2	24.6
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30	4.7	63.8	31.9	16.0
Wg=32	4.7	63.8	31.9	16.0
Wg=34	4.85	61.9	30.9	15.5
Wg=36	5.05	59.4	29.7	14.9
Wg=38	5.15	58.3	29.1	14.6
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30	7.75	38.7	19.4	9.7
Wg=32	7.5	40.0	20.0	10.0
Wg=34	7.3	41.1	20.5	10.3
Wg=36	7.05	42.6	21.3	10.6
Wg=38	6.85	43.8	21.9	10.9
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30				
Wg=32	11.4	26.3	13.2	6.6
Wg=34	11.25	26.7	13.3	6.7
Wg=36	11	27.3	13.6	6.8
Wg=38	10.8	27.8	13.9	6.9
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
Wg=30	15.45	19.4	9.7	4.9
Wg=32	15	20.0	10.0	5.0
Wg=34	14.5	20.7	10.3	5.2
Wg=36	14.15	21.2	10.6	5.3
Wg=38				

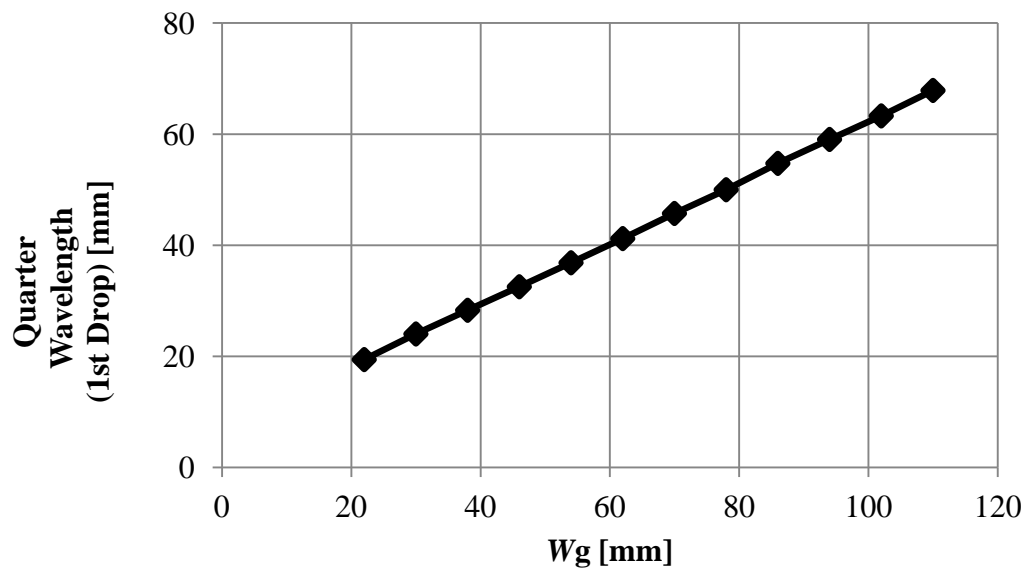


図 3.1.1.6 第 1 の谷に対応する波長と  $W_g$  の線形な変化

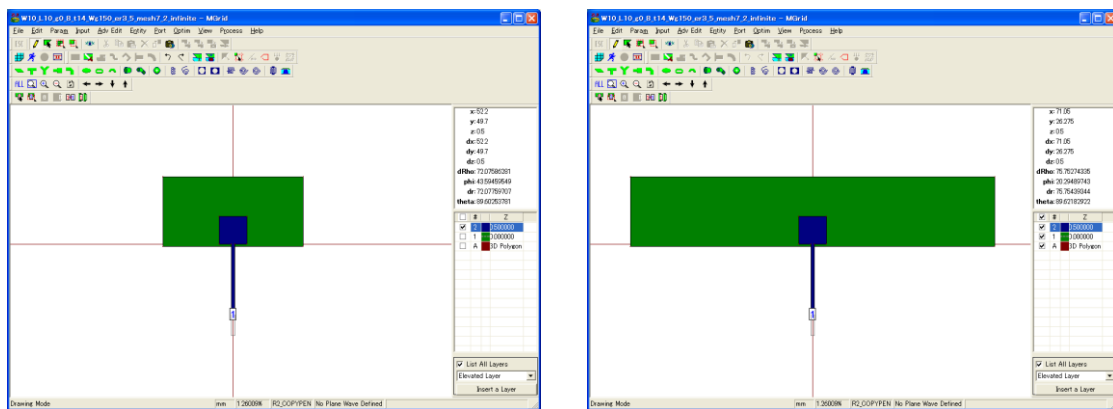


図 3.1.1.7 第 1 の谷のパラメータスタディ ( $W_g$  : 22~110 mm)

### 3.1.2 $L$ の効果

$L$  のパラメータスタディの様子を図 3.1.2.1 に示す. 無限グランド計算による  $L$  を 10~12 mm と変化させたときの反射特性および利得特性の変化を図 3.1.2.2, 3.1.2.3 に, 有限グランド計算の場合を図 3.1.2.4, 3.1.2.5 を示す. 反射特性の各谷の周波数を  $1/4$  波長,  $1/2$  波長, 1 波長に換算した数値と, そのときの  $L$  の寸法(8~12 mm)との対応を表 3.1.2.1, 3.1.2.2 に示す. また,  $L$  を 10~30 mm と広範囲に変化させたときの第 1 の谷に対応する波長の推移を図 3.1.2.6 に示す. そのときの  $L$  の変化の様子を図 3.1.2.7 に示す.

図 3.1.2.2~3.1.2.5 より  $L$  の変化により第 1, 3, 4 の谷が顕著にシフトしていることが分かる. 特に図 3.1.2.6 に示すように,  $L$  の変化と第 1 の谷の波長の変化が線形的な関係を持っている. すなわち, 第 1 の谷を決定するエレメントが表面パッチの長さ  $L$  に依存していることを表す. 同様に, 第 3, 4 の谷が  $L$  に依存していることを表す. 項 3.1.1 の結果と照らし合わせると, 第 1 の谷は表面パッチの長さ  $L$  と裏面窓の横幅  $W_g$  のそれぞれに対応して, 第 1 の谷の波長が変化した. すなわち, 第 1 の谷では表面と裏面のエレメント同士が結合して 1 つのエレメントとして共振している. (章 4 参照)

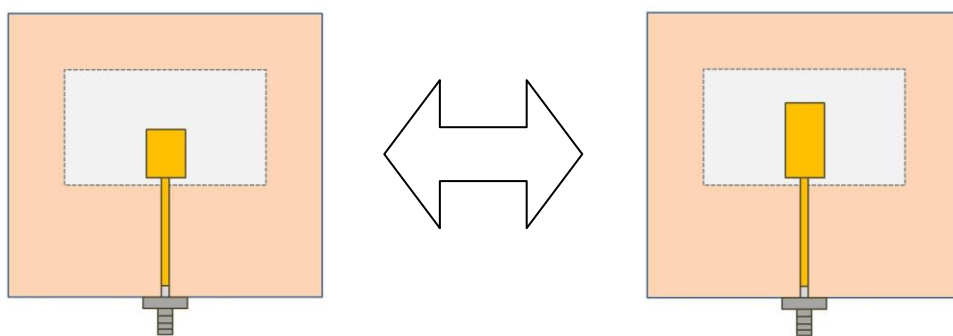


図 3.1.2.1 パラメータスタディ ( $L$  の変化)

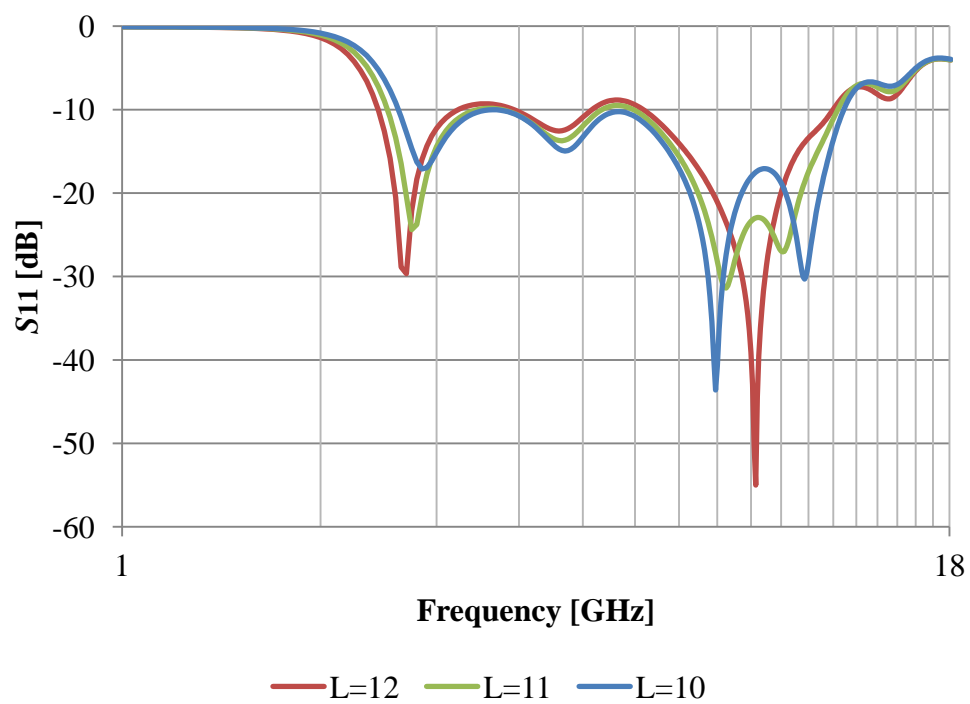


図 3.1.2.2 無限グランド計算による  $L$  のパラメータスタディ (反射特性)

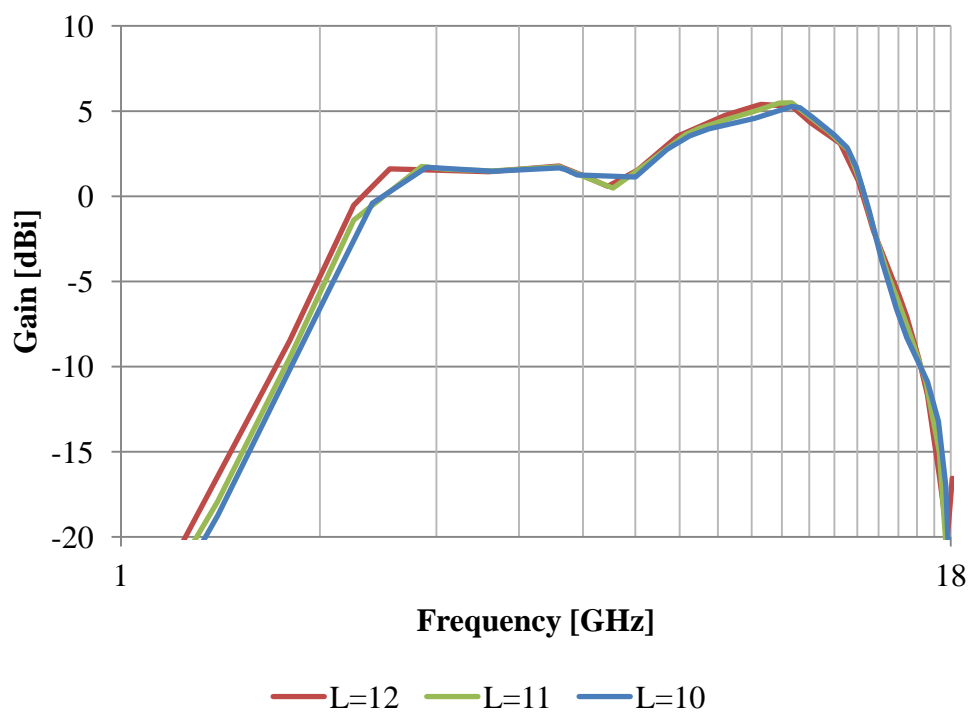


図 3.1.2.3 無限グランド計算による  $L$  のパラメータスタディ (利得特性)

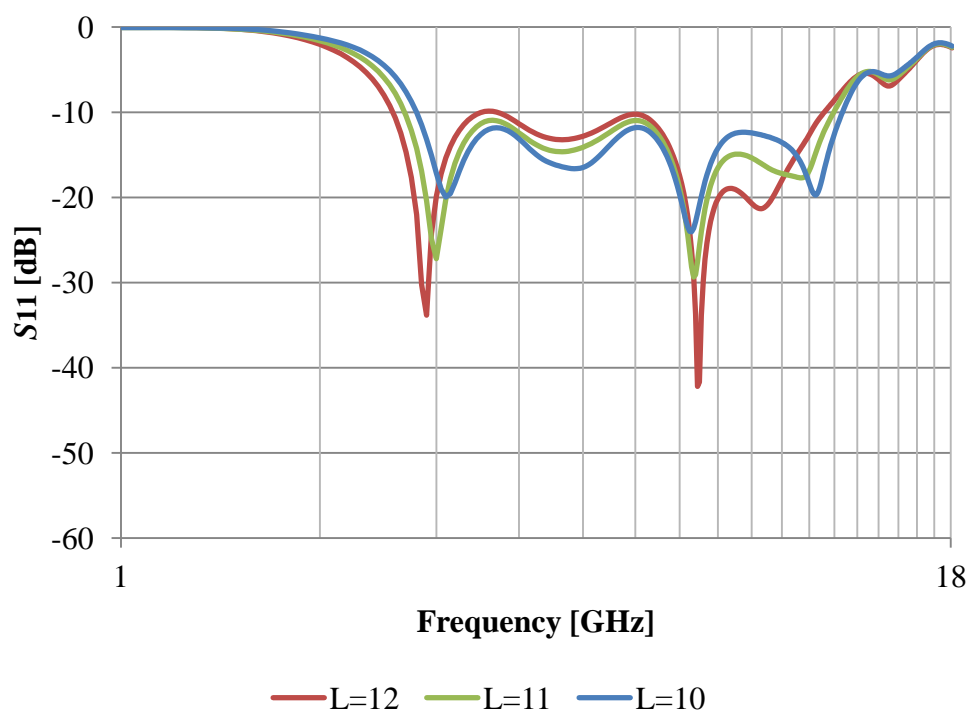


図 3.1.2.4 有限グランド計算による  $L$  のパラメータスタディ (反射特性)

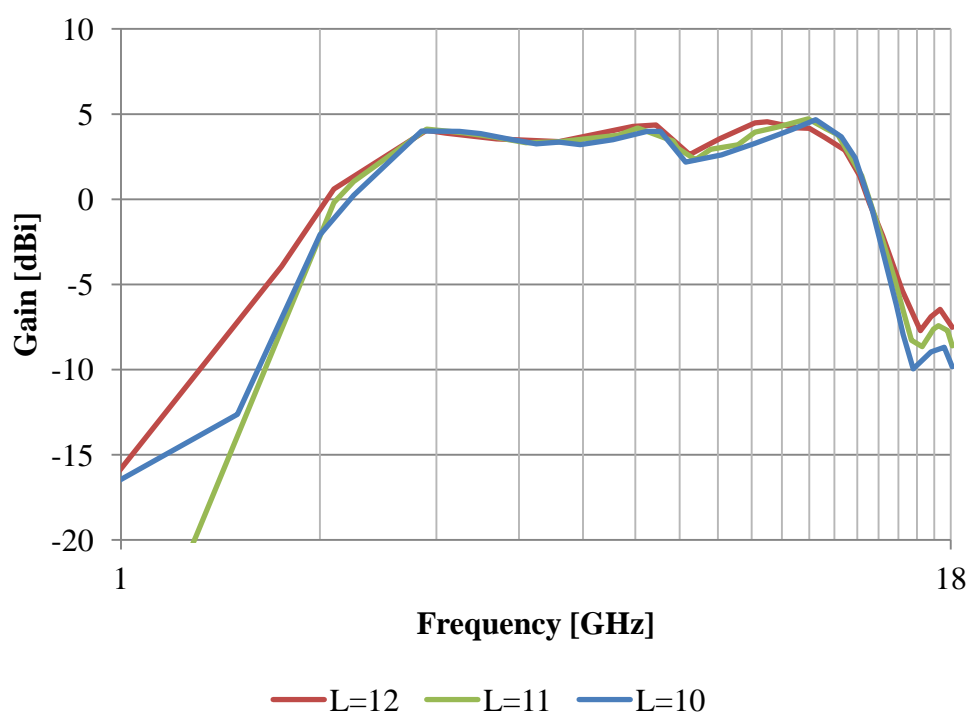


図 3.1.2.5 有限グランド計算による  $L$  のパラメータスタディ (利得特性)

表 3.1.2.1 各谷の周波数と対応する波長（無限グランド計算：L）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8	3.1	96.8	48.4	24.2
L=9	2.95	101.7	50.8	25.4
L=10	2.85	105.3	52.6	26.3
L=11	2.75	109.1	54.5	27.3
L=12	2.7	111.1	55.6	27.8
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8	4.9	61.2	30.6	15.3
L=9	4.8	62.5	31.3	15.6
L=10	4.7	63.8	31.9	16.0
L=11	4.65	64.5	32.3	16.1
L=12	4.6	65.2	32.6	16.3
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8	7.75	38.7	19.4	9.7
L=9	7.8	38.5	19.2	9.6
L=10	7.95	37.7	18.9	9.4
L=11	8.25	36.4	18.2	9.1
L=12	9.15	32.8	16.4	8.2
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8	12	25.0	12.5	6.3
L=9	11.5	26.1	13.0	6.5
L=10	10.85	27.6	13.8	6.9
L=11	10.05	29.9	14.9	7.5
L=12				
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8				
L=9	14.55	20.6	10.3	5.2
L=10	14.65	20.5	10.2	5.1
L=11	14.6	20.5	10.3	5.1
L=12	14.55	20.6	10.3	5.2

表 3.1.2.2 各谷の周波数と対応する波長（有限グランド計算：L）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8	3.35	89.6	44.8	22.4
L=9	3.25	92.3	46.2	23.1
L=10	3.1	96.8	48.4	24.2
L=11	3	100.0	50.0	25.0
L=12	2.9	103.4	51.7	25.9
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8	5.15	58.3	29.1	14.6
L=9	5	60.0	30.0	15.0
L=10	4.85	61.9	30.9	15.5
L=11	4.65	64.5	32.3	16.1
L=12	4.65	64.5	32.3	16.1
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8	7.1	42.3	21.1	10.6
L=9	7.2	41.7	20.8	10.4
L=10	7.3	41.1	20.5	10.3
L=11	7.35	40.8	20.4	10.2
L=12	7.45	40.3	20.1	10.1
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8	12.1	24.8	12.4	6.2
L=9	11.65	25.8	12.9	6.4
L=10	11.25	26.7	13.3	6.7
L=11	10.7	28.0	14.0	7.0
L=12	9.3	32.3	16.1	8.1
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
L=8				
L=9	14.4	20.8	10.4	5.2
L=10	14.5	20.7	10.3	5.2
L=11	14.55	20.6	10.3	5.2
L=12	14.5	20.7	10.3	5.2



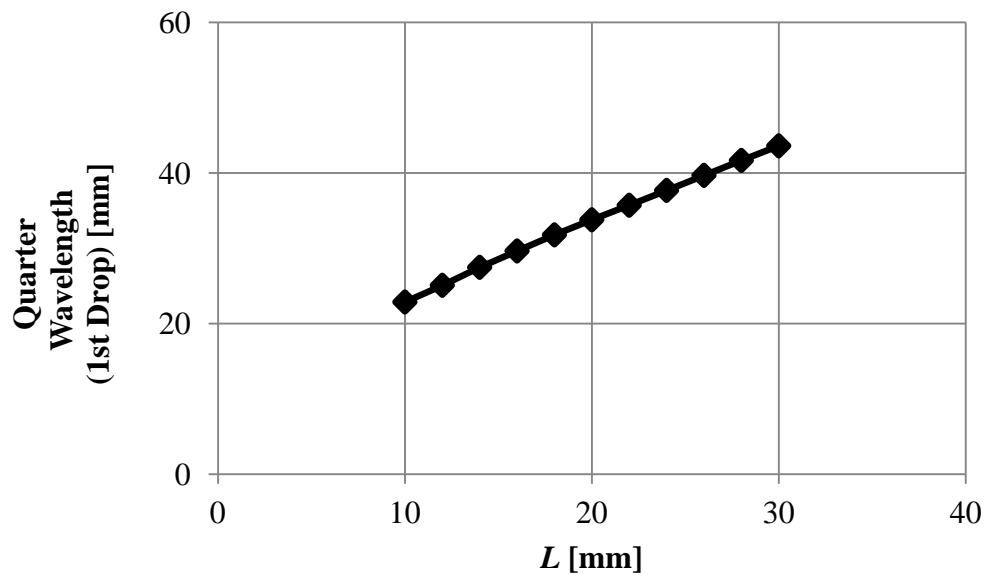


図 3.1.2.6 第 1 の谷に対応する波長と  $L$  の線形な変化

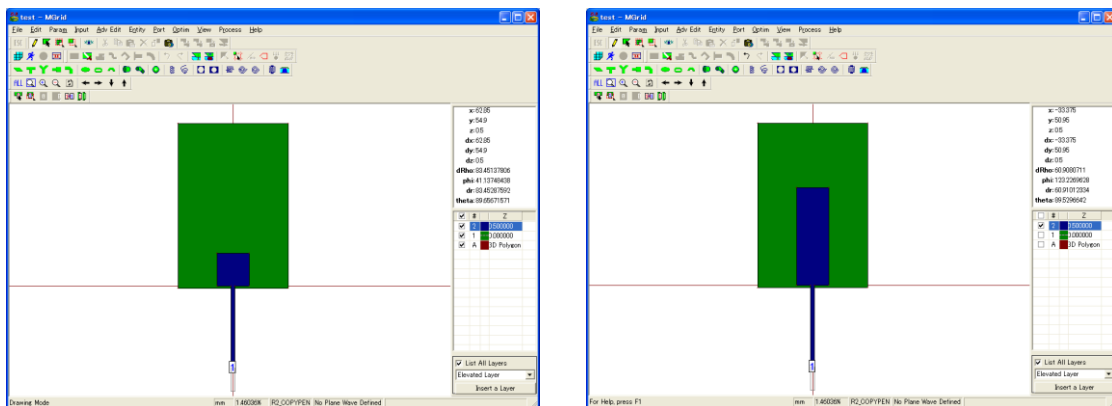


図 3.1.2.7 第 1 の谷のパラメータスタディ ( $L$  : 10~30 mm)

なお、パッチ上部とグラウンド導体との結合の影響を考慮して、裏面窓の縦幅  $L_g$  を 50 mm に固定した。

### 3.1.3 $W$ の効果

$W$  のパラメータスタディの様子を図 3.1.3.1 に示す．無限グランド計算による  $W$  を 6~10 mm と変化させたときの反射特性および利得特性の変化を図 3.1.3.2, 3.1.3.3 に，有限グランド計算の場合を図 3.1.3.4, 3.1.3.5 を示す．反射特性の各谷の周波数を 1/4 波長，1/2 波長，1 波長に換算した数値と，そのときの  $W$  の寸法 (6~12 mm) との対応を表 3.1.3.1, 3.1.3.2 に示す．

$W$  の寸法の変化と各谷のシフト量が線形性をもたないため，結合部としての機能が主であると考えられる．また，アンテナの構造より， $W$  は表面パッチのスタブとしての長さおよび特性インピーダンスを決定するパラメータでもある．

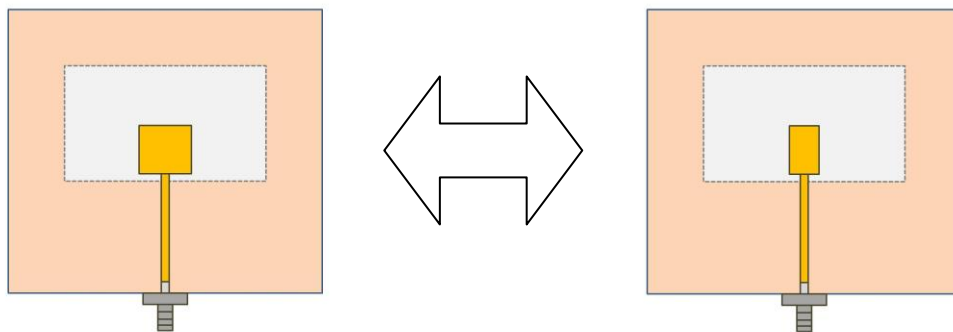


図 3.1.3.1 パラメータスタディ ( $W$  の変化)

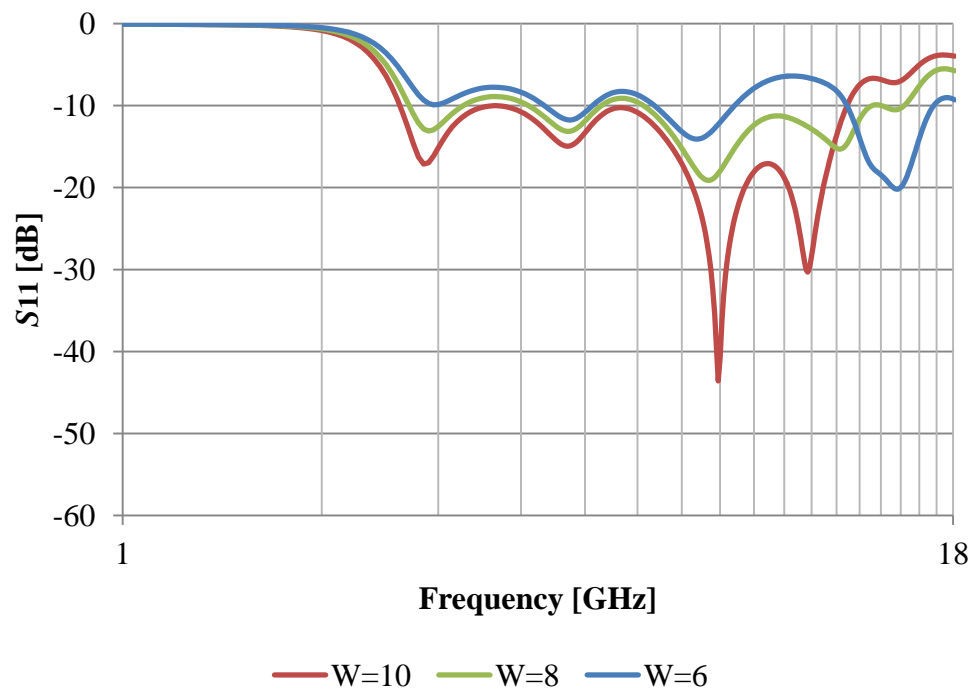


図 3.1.3.2 無限グラウンド計算による  $W$  のパラメータスタディ (反射特性)

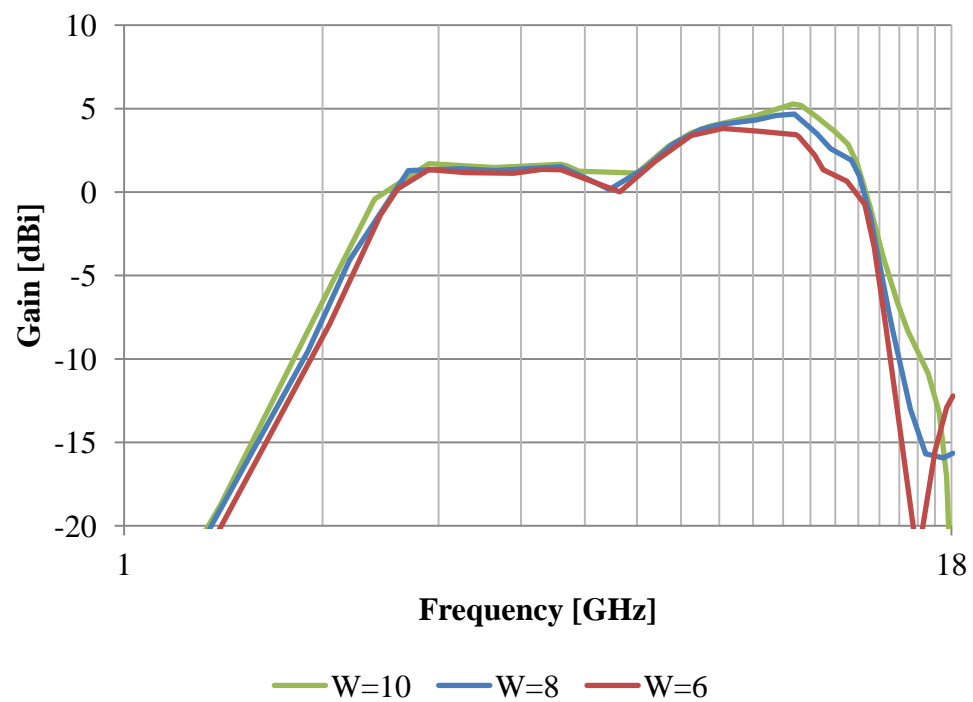


図 3.1.3.3 無限グラウンド計算による  $W$  のパラメータスタディ (利得特性)

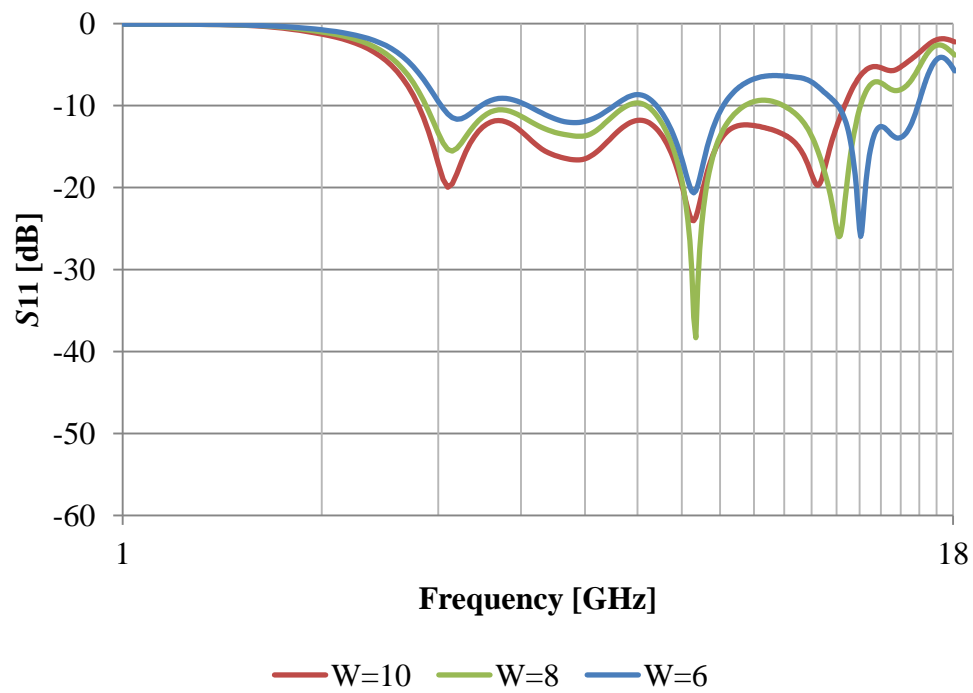


図 3.1.3.4 有限グランド計算による  $W$  のパラメータスタディ (反射特性)

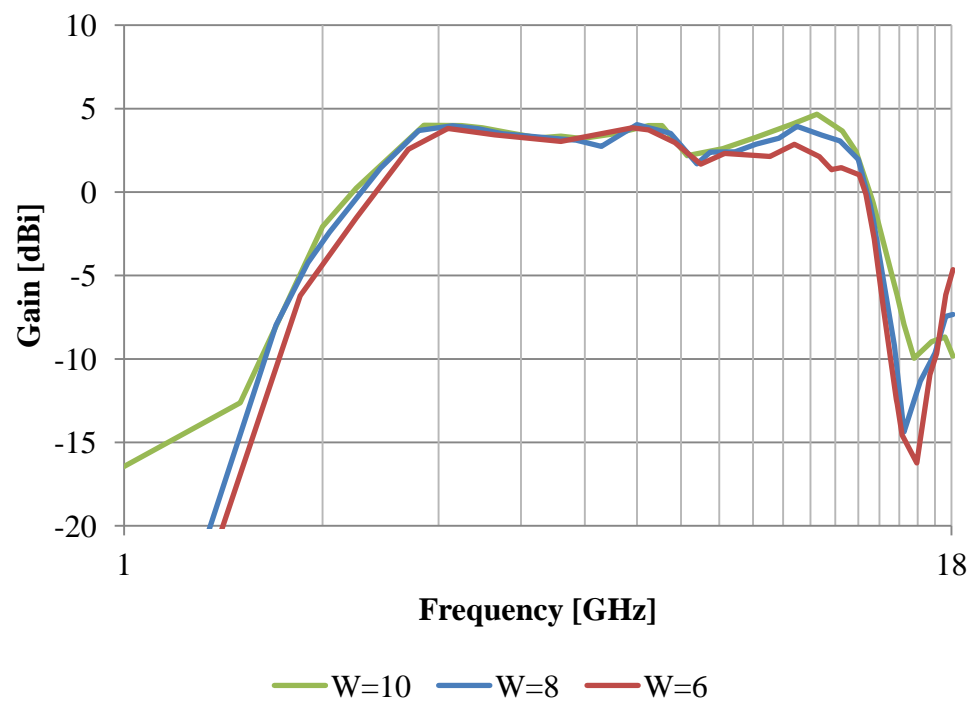


図 3.1.3.5 有限グランド計算による  $W$  のパラメータスタディ (利得特性)

表 3.1.3.1 各谷の周波数と対応する波長（無限グランド計算：W）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	2.95	101.7	50.8	25.4
W=8	2.9	103.4	51.7	25.9
W=10	2.85	105.3	52.6	26.3
W=12	2.85	105.3	52.6	26.3
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	4.75	63.2	31.6	15.8
W=8	4.7	63.8	31.9	16.0
W=10	4.7	63.8	31.9	16.0
W=12	4.7	63.8	31.9	16.0
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	7.4	40.5	20.3	10.1
W=8	7.7	39.0	19.5	9.7
W=10	7.95	37.7	18.9	9.4
W=12	7.55	39.7	19.9	9.9
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6				
W=8	12.15	24.7	12.3	6.2
W=10	10.85	27.6	13.8	6.9
W=12				
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	14.8	20.3	10.1	5.1
W=8	14.7	20.4	10.2	5.1
W=10	14.65	20.5	10.2	5.1
W=12	14.65	20.5	10.2	5.1

表 3.1.3.2 各谷の周波数と対応する波長（有限グランド計算：W）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	3.2	93.8	46.9	23.4
W=8	3.15	95.2	47.6	23.8
W=10	3.1	96.8	48.4	24.2
W=12	3.1	96.8	48.4	24.2
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	4.8	62.5	31.3	15.6
W=8	4.9	61.2	30.6	15.3
W=10	4.85	61.9	30.9	15.5
W=12	4.8	62.5	31.3	15.6
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	7.3	41.1	20.5	10.3
W=8	7.35	40.8	20.4	10.2
W=10	7.3	41.1	20.5	10.3
W=12	7	42.9	21.4	10.7
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	13.05	23.0	11.5	5.7
W=8	12.1	24.8	12.4	6.2
W=10	11.25	26.7	13.3	6.7
W=12	11.15	26.9	13.5	6.7
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
W=6	14.85	20.2	10.1	5.1
W=8	14.75	20.3	10.2	5.1
W=10	14.5	20.7	10.3	5.2
W=12	14.55	20.6	10.3	5.2

### 3.1.4 $g$ の効果

$g$  のパラメータスタディの様子を図 3.1.4.1 に示す. 無限グランド計算による  $g$  を 0.6~1.0 mm と変化させたときの反射特性および利得特性の変化を図 3.1.4.2, 3.1.4.3 に, 有限グランド計算の場合を図 3.1.4.4, 3.1.4.5 を示す. 反射特性の各谷の周波数を 1/4 波長, 1/2 波長, 1 波長に換算した数値と, そのときの  $g$  の寸法 (0.6~1.4 mm) との対応を表 3.1.4.1, 3.1.4.2 に示す.

$g$  の寸法の変化と各谷のシフト量が線形性をもたないため, 結合部として機能する. この寸法は, 表面パッチと裏面開口導体間の結合を司るパラメータであり, 適度な結合を与えることにより, 低域 (第 1, 2 の谷) と高域 (第 4, 5 の谷) の反射特性を調整でき, 結果としてアンテナに広帯域動作をもたらすことになる. そのため, 結合部  $g$  は重要なパラメータである.

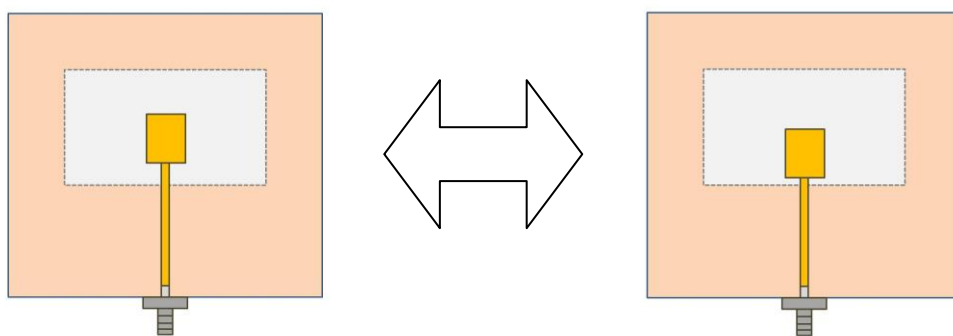


図 3.1.4.1 パラメータスタディ ( $g$  の変化)

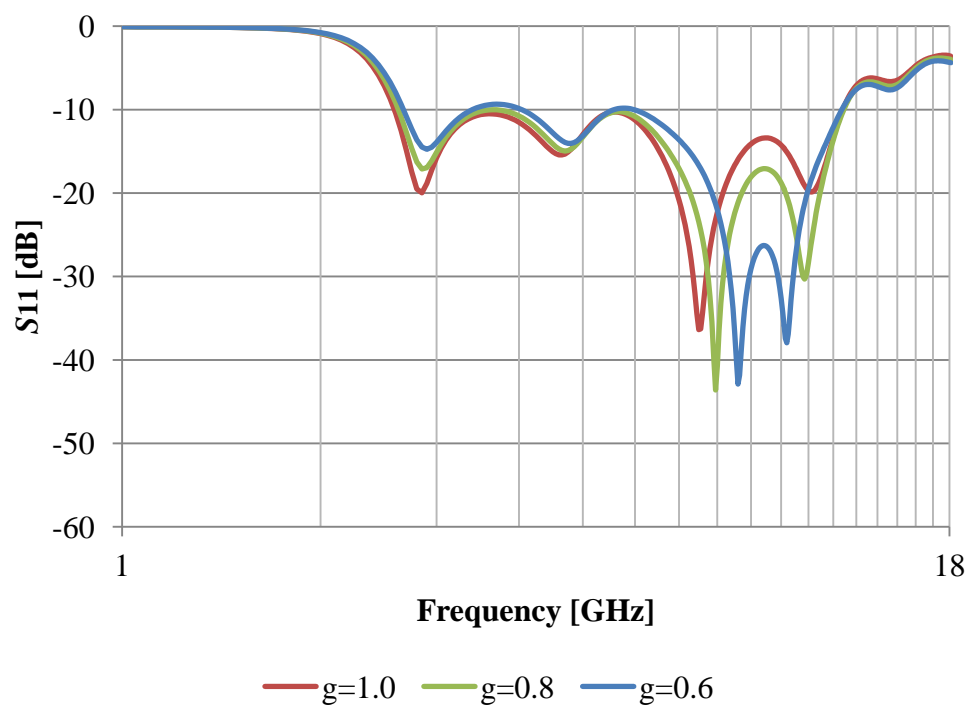


図 3.1.4.2 無限グラウンド計算による  $g$  のパラメータスタディ（反射特性）

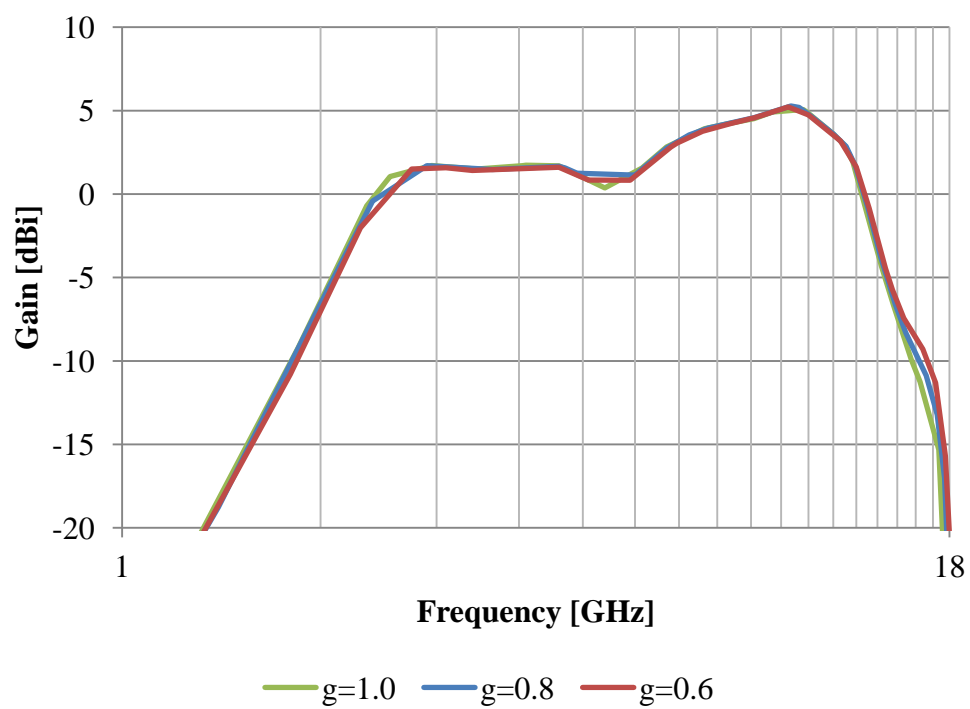


図 3.1.4.3 無限グラウンド計算による  $g$  のパラメータスタディ（利得特性）



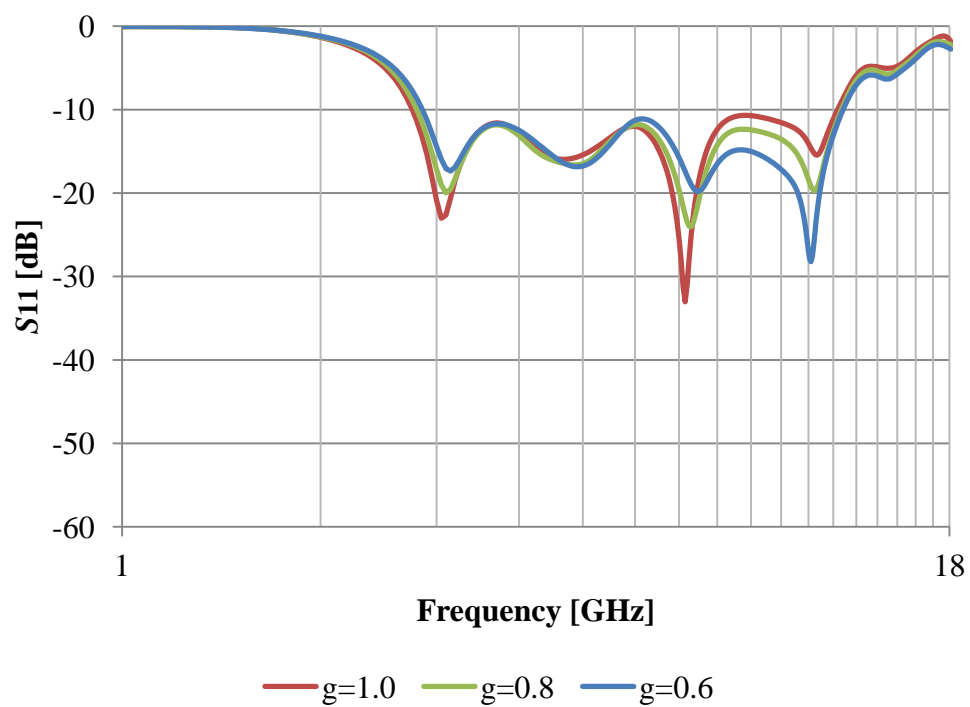


図 3.1.4.4 有限グランド計算による  $g$  のパラメータスタディ（反射特性）

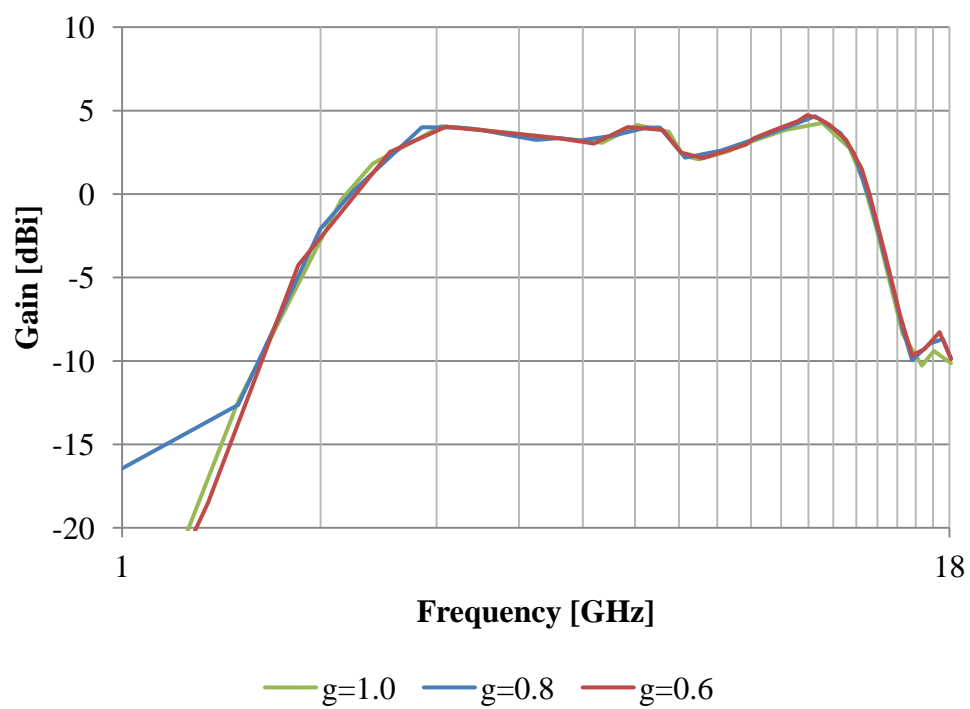


図 3.1.4.5 有限グランド計算による  $g$  のパラメータスタディ（利得特性）

表 3.1.4.1 各谷の周波数と対応する波長（無限グラウンド計算：g）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
g=0.4	2.95	101.7	50.8	25.4
g=0.6	2.9	103.4	51.7	25.9
g=0.8	2.85	105.3	52.6	26.3
g=1.0	2.85	105.3	52.6	26.3
g=1.2	2.8	107.1	53.6	26.8
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
g=0.4	4.85	61.9	30.9	15.5
g=0.6	4.8	62.5	31.3	15.6
g=0.8	4.7	63.8	31.9	16.0
g=1.0	4.65	64.5	32.3	16.1
g=1.2	4.55	65.9	33.0	16.5
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
g=0.4	9.35	32.1	16.0	8.0
g=0.6	8.6	34.9	17.4	8.7
g=0.8	7.95	37.7	18.9	9.4
g=1.0	7.5	40.0	20.0	10.0
g=1.2	7.25	41.4	20.7	10.3
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
g=0.4				
g=0.6	10.2	29.4	14.7	7.4
g=0.8	10.85	27.6	13.8	6.9
g=1.0	11.1	27.0	13.5	6.8
g=1.2	11.2	26.8	13.4	6.7
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
g=0.4	14.6	20.5	10.3	5.1
g=0.6	14.6	20.5	10.3	5.1
g=0.8	14.65	20.5	10.2	5.1
g=1.0	14.65	20.5	10.2	5.1
g=1.2	14.7	20.4	10.2	5.1

表 3.1.4.2 各谷の周波数と対応する波長（有限グラウンド計算： $g$ ）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
$g=0.4$	3.2	93.8	46.9	23.4
$g=0.6$	3.15	95.2	47.6	23.8
$g=0.8$	3.1	96.8	48.4	24.2
$g=1.0$	3.05	98.4	49.2	24.6
$g=1.2$	3.05	98.4	49.2	24.6
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
$g=0.4$	5	60.0	30.0	15.0
$g=0.6$	4.9	61.2	30.6	15.3
$g=0.8$	4.85	61.9	30.9	15.5
$g=1.0$	4.7	63.8	31.9	16.0
$g=1.2$	4.55	65.9	33.0	16.5
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
$g=0.4$				
$g=0.6$	7.5	40.0	20.0	10.0
$g=0.8$	7.3	41.1	20.5	10.3
$g=1.0$	7.15	42.0	21.0	10.5
$g=1.2$	7.05	42.6	21.3	10.6
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
$g=0.4$	10.75	27.9	14.0	7.0
$g=0.6$	11.1	27.0	13.5	6.8
$g=0.8$	11.25	26.7	13.3	6.7
$g=1.0$	11.3	26.5	13.3	6.6
$g=1.2$	11.3	26.5	13.3	6.6
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
$g=0.4$	14.4	20.8	10.4	5.2
$g=0.6$	14.45	20.8	10.4	5.2
$g=0.8$	14.5	20.7	10.3	5.2
$g=1.0$	14.5	20.7	10.3	5.2
$g=1.2$	14.6	20.5	10.3	5.1

### 3.1.5 $d$ の効果

$d$  のパラメータスタディの様子を図 3.1.5.1 に示す. 無限グランド計算による  $d$  を 10~14 mm と変化させたときの反射特性および利得特性の変化を図 3.1.5.2, 3.1.5.3 に, 有限グランド計算の場合を図 3.1.5.4, 3.1.5.5 を示す. 反射特性の各谷の周波数を 1/4 波長, 1/2 波長, 1 波長に換算した数値と, そのときの  $d$  の寸法 (10~18 mm) との対応を表 3.1.5.1, 3.1.5.2 に示す. ただし,  $d$  のパラメータスタディは裏面窓の  $L_g$  も共に変化する.

現状,  $d$  の機能は解明していない. 裏面グランド導体の共振器が裏面窓の“へり”であることを考えると,  $d$  が大きくなると裏面窓が大きくなり第 1 の谷は低域シフトするはずである. しかし, 図 3.1.5.2, 3.1.5.4 に示すように第 1 の谷は高域シフトしている. このことから  $d$  がアンテナの特性に及ぼす影響は, 裏面グランド導体によるエレメントの長さとしての影響だけではなく表面パッチ上部と裏面グランド導体間の結合にも寄与していると考えられる.

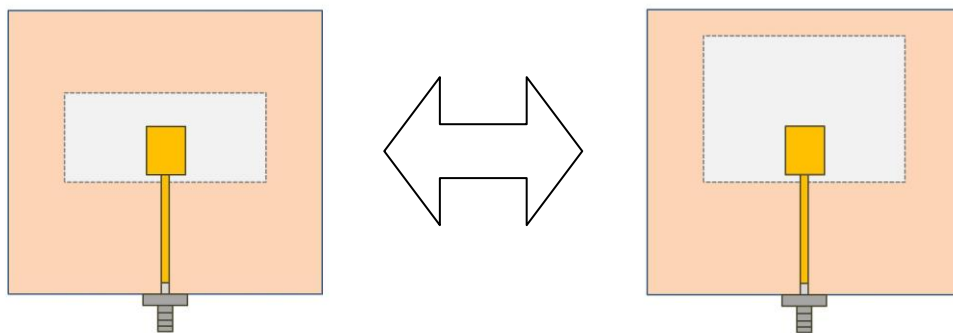


図 3.1.5.1 パラメータスタディ ( $d$  の変化)

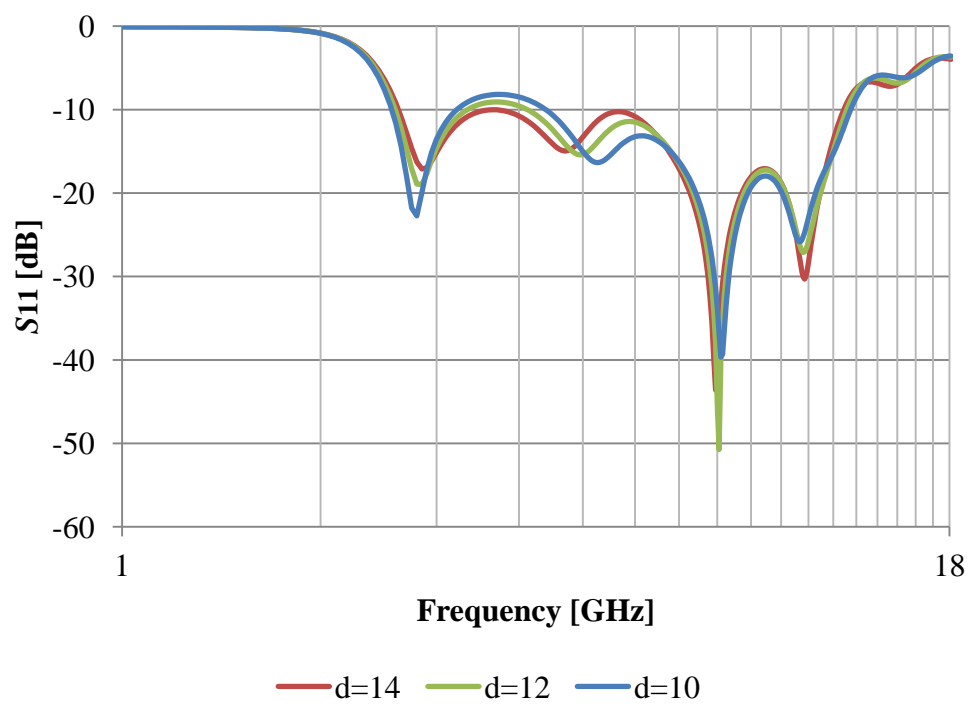


図 3.1.5.2 無限グランド計算による  $d$  のパラメータスタディ (反射特性)

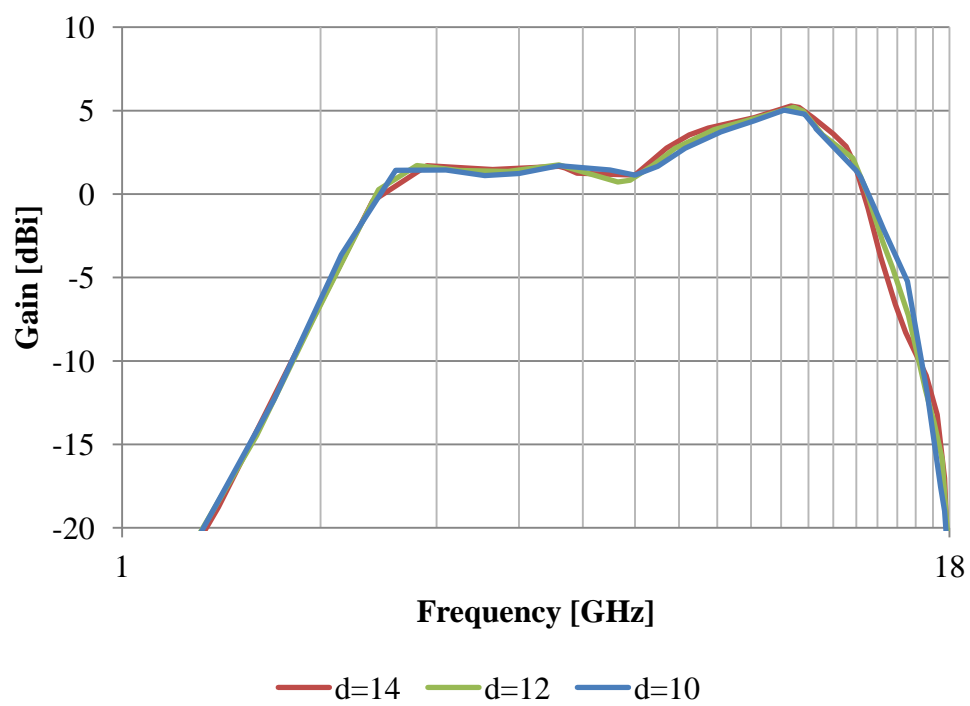


図 3.1.5.3 無限グランド計算による  $d$  のパラメータスタディ (利得特性)

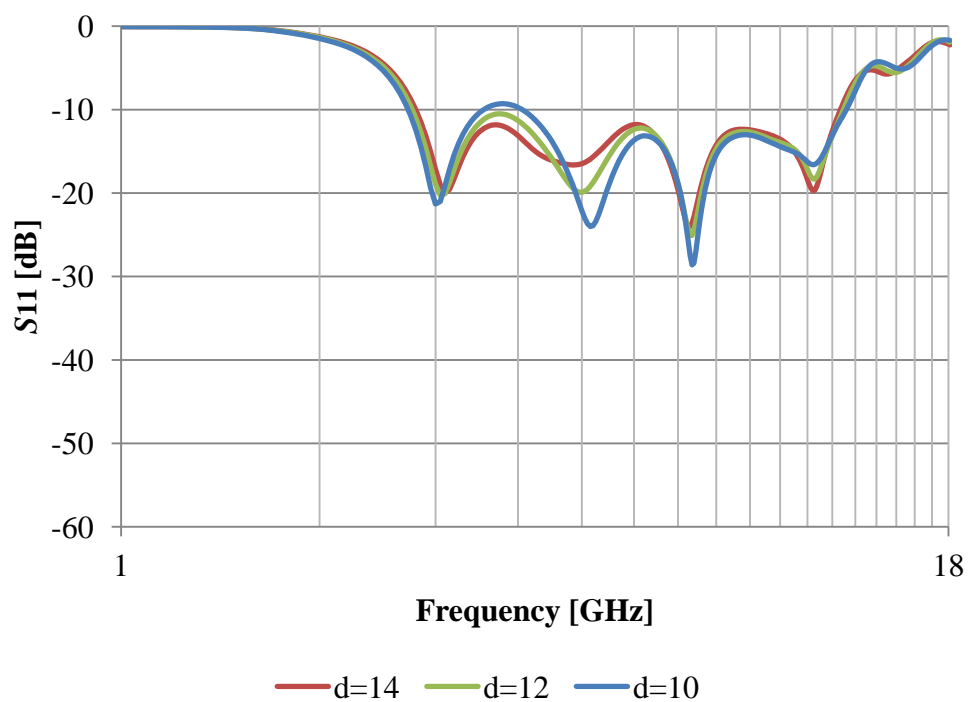


図 3.1.5.4 有限グランド計算による  $d$  のパラメータスタディ (反射特性)

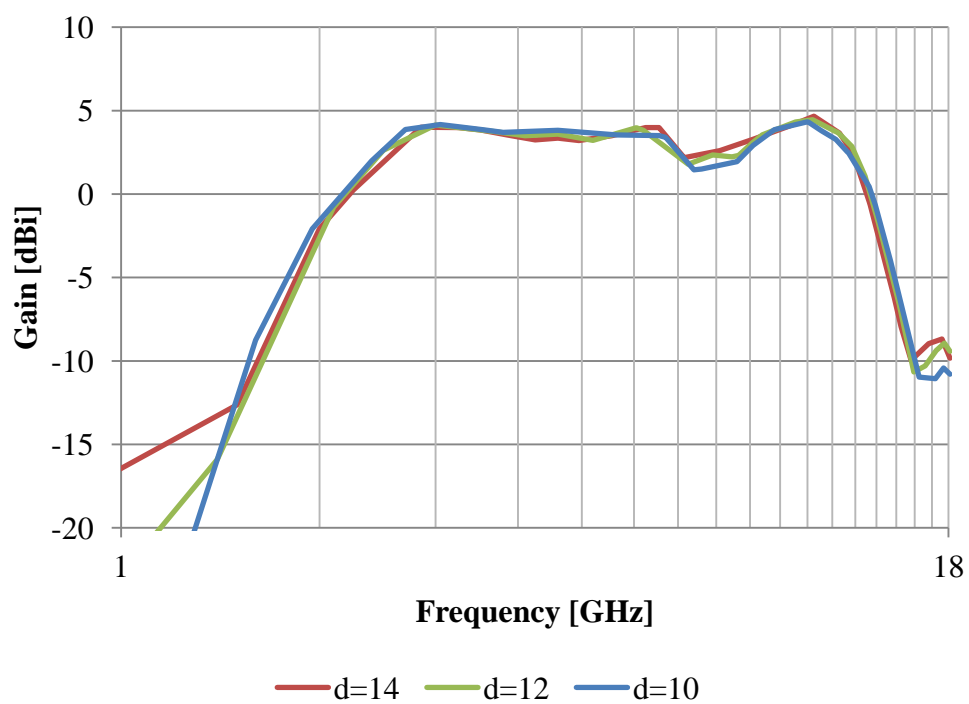


図 3.1.5.5 有限グランド計算による  $d$  のパラメータスタディ (利得特性)

表 3.1.5.1 各谷の周波数と対応する波長（無限グランド計算： $d$ ）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	2.8	107.1	53.6	26.8
d=12	2.85	105.3	52.6	26.3
d=14	2.85	105.3	52.6	26.3
d=16	2.9	103.4	51.7	25.9
d=18	2.95	101.7	50.8	25.4
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	5.25	57.1	28.6	14.3
d=12	4.95	60.6	30.3	15.2
d=14	4.7	63.8	31.9	16.0
d=16	4.5	66.7	33.3	16.7
d=18	4.3	69.8	34.9	17.4
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	8.1	37.0	18.5	9.3
d=12	8.05	37.3	18.6	9.3
d=14	7.95	37.7	18.9	9.4
d=16	7.85	38.2	19.1	9.6
d=18	7.8	38.5	19.2	9.6
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	10.65	28.2	14.1	7.0
d=12	10.8	27.8	13.9	6.9
d=14	10.85	27.6	13.8	6.9
d=16	10.85	27.6	13.8	6.9
d=18	10.8	27.8	13.9	6.9
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	15.3	19.6	9.8	4.9
d=12	15	20.0	10.0	5.0
d=14	14.65	20.5	10.2	5.1
d=16	14.25	21.1	10.5	5.3
d=18				

表 3.1.5.2 各谷の周波数と対応する波長（有限グランド計算： $d$ ）※波長[mm]

第 1 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	3	100.0	50.0	25.0
d=12	3.05	98.4	49.2	24.6
d=14	3.1	96.8	48.4	24.2
d=16	3.15	95.2	47.6	23.8
d=18	3.2	93.8	46.9	23.4
第 2 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	5.15	58.3	29.1	14.6
d=12	5	60.0	30.0	15.0
d=14	4.85	61.9	30.9	15.5
d=16	4.1	73.2	36.6	18.3
d=18	3.9	76.9	38.5	19.2
第 3 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	7.35	40.8	20.4	10.2
d=12	7.35	40.8	20.4	10.2
d=14	7.3	41.1	20.5	10.3
d=16	7.2	41.7	20.8	10.4
d=18	7.2	41.7	20.8	10.4
第 4 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	11.2	26.8	13.4	6.7
d=12	11.25	26.7	13.3	6.7
d=14	11.25	26.7	13.3	6.7
d=16	11.15	26.9	13.5	6.7
d=18	11.15	26.9	13.5	6.7
第 5 の谷	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
d=10	15.3	19.6	9.8	4.9
d=12	14.9	20.1	10.1	5.0
d=14	14.5	20.7	10.3	5.2
d=16	14.1	21.3	10.6	5.3
d=18				



### 3.1.6 基板の面積の効果

項 3.1.1 の  $W_g$  のパラメータスタディ結果より, 基板の裏面グランド導体がアンテナエレメントとして機能していることを解明した. したがって, 本アンテナの特性は裏面グランド導体の面積に大きく依存している. 本項では, 図 3.1.6.1 に示すように裏面グランド導体によるエレメントが裏面窓の“ふち”であると仮定し, その“ふち”の長さや幅のパラメータスタディを行った.

裏面グランド導体および給電線の寸法  $(G_1, G_2, W_s, W_t, L_f)$  を図 3.1.6.2 に示す. 基準アンテナの  $(G_1, G_2, W_s, W_t, L_f)$  の値を表 3.1.6.1 に示す. なお, 裏面グランド面のパラメータスタディにおける計算はすべて有限グランド計算である. 基準アンテナは  $(W, L, g, d, W_g)$  のパラメータスタディの結果に大きく影響しないようにグランド面を広く設定している. 有限グランド面 (基準アンテナ) と無限グランド面の反射特性と利得特性の比較をそれぞれ図 3.1.6.3, 3.1.6.4 に示す.

裏面グランド面のパラメータスタディより, グランド面積は利得特性に大きく影響を与えることが分かった. 以下, パラメータスタディ結果を記述する.

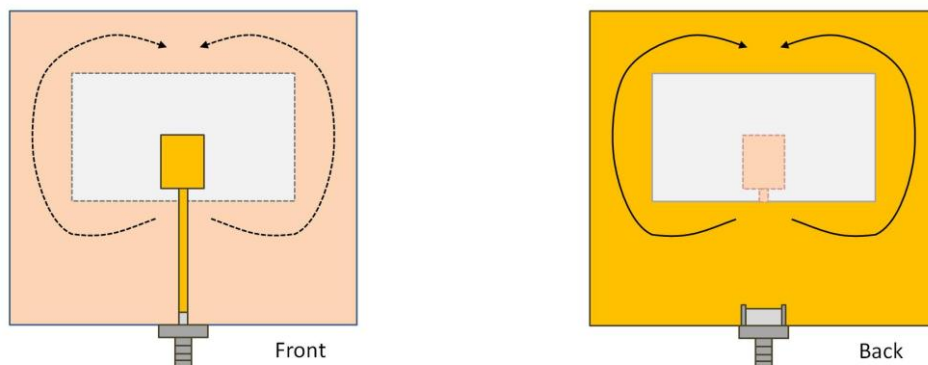


図 3.1.6.1 推定した裏面グランド導体によるエレメント

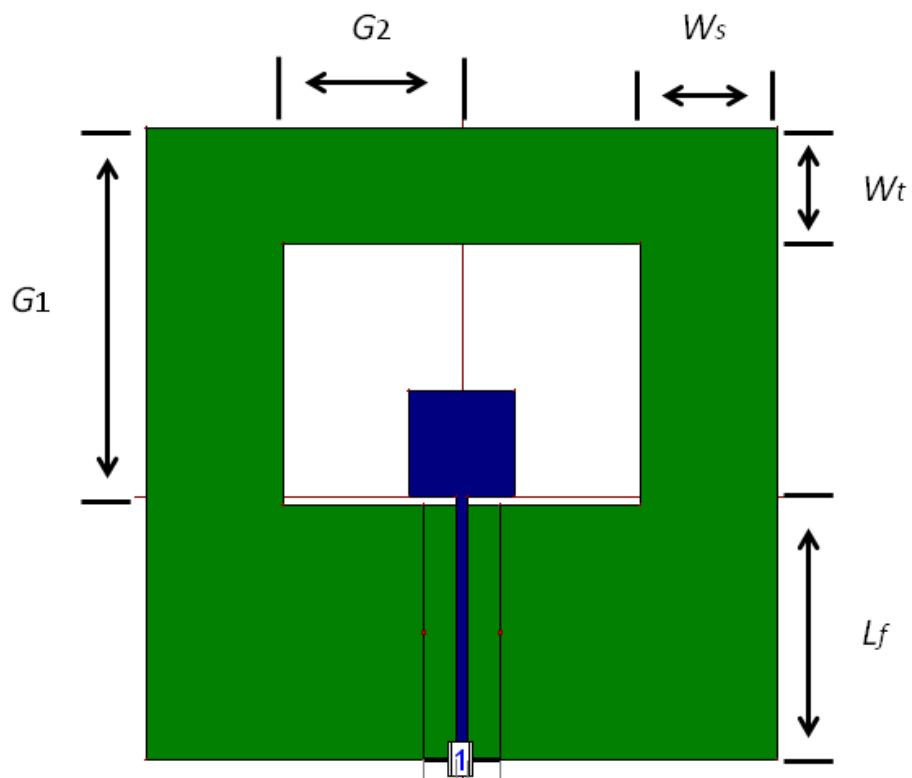


図 3.1.6.2 寸法( $G_1, G_2, W_s, W_t, L_f$ )

表 3.1.6.1 基準アンテナの裏面グランド面パラメータ

裏面アンテナ	$G_1 = 35.8 \text{ mm}$
エレメント長	$G_2 = 17.0 \text{ mm}$
裏面アンテナ	$W_s = 13.0 \text{ mm}$
エレメント幅	$W_t = 11.0 \text{ mm}$
給電線長さ	$L_f = 25.0 \text{ mm}$

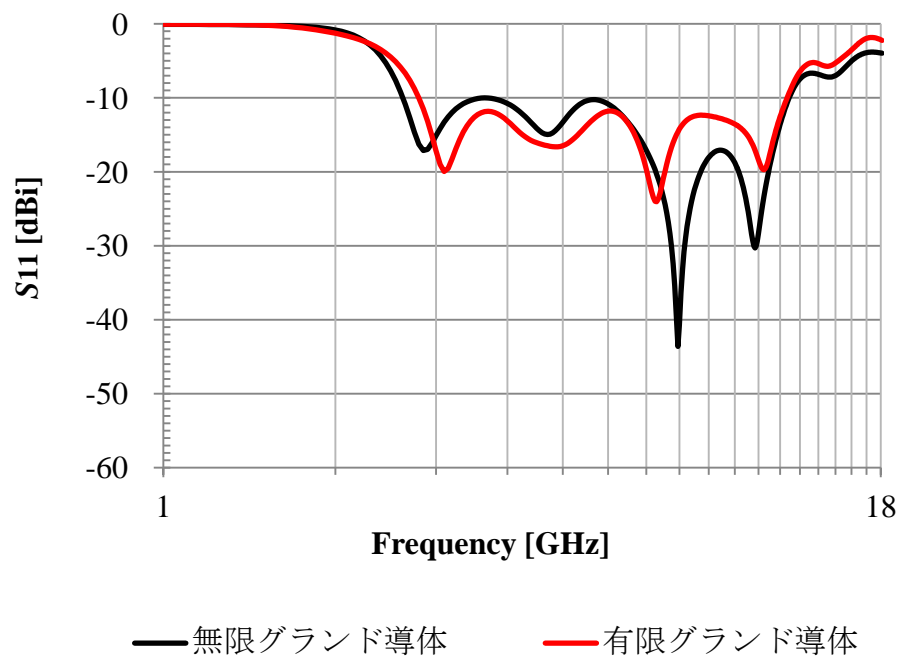


図 3.1.6.3 有限グラウンド面（基準アンテナ）と無限グラウンド面の反射特性

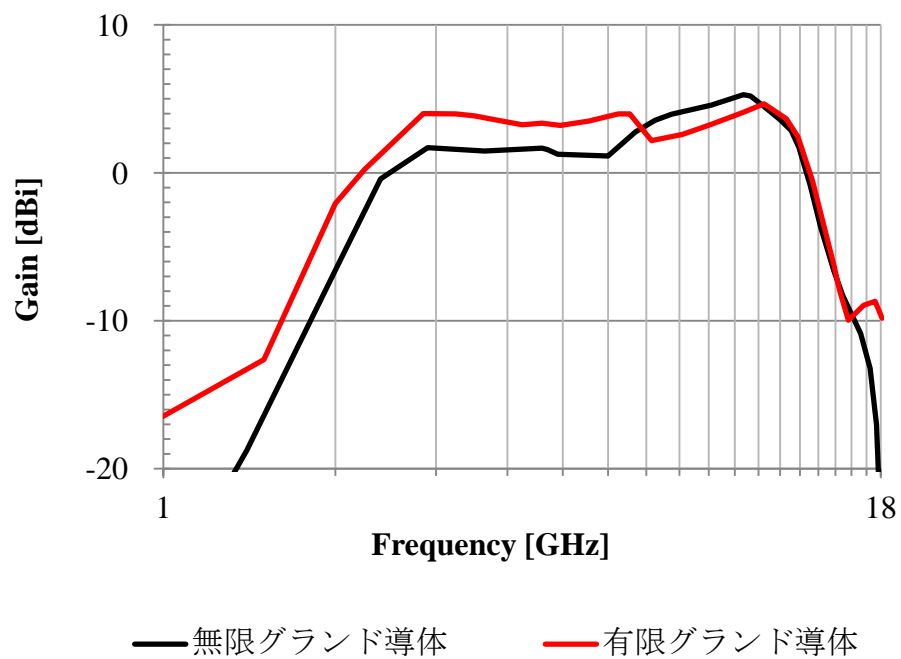


図 3.1.6.4 有限グラウンド面（基準アンテナ）と無限グラウンド面の利得特性

## $G_2$ の効果 :

$G_2$  を図 3.1.6.5 のように変化させた時の反射特性および利得特性の変化を図 3.1.6.6, 3.1.6.7 に示す. このようにパッチ上側の窓枠は特性に大きな影響を与えず,  $G_2$  が左右合わせて 34 mm 短くなったのに対して第 1 の谷の周波数は 80 MHz ほどしか変化しなかった. なお, 図 3.1.6.6~7 の凡例は  $G_1 + G_2$  の表記である.

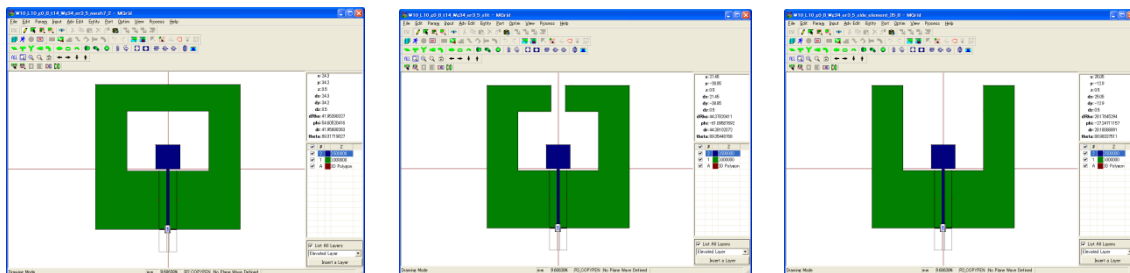


図 3.1.6.5  $G_2$  のパラメータスタディ

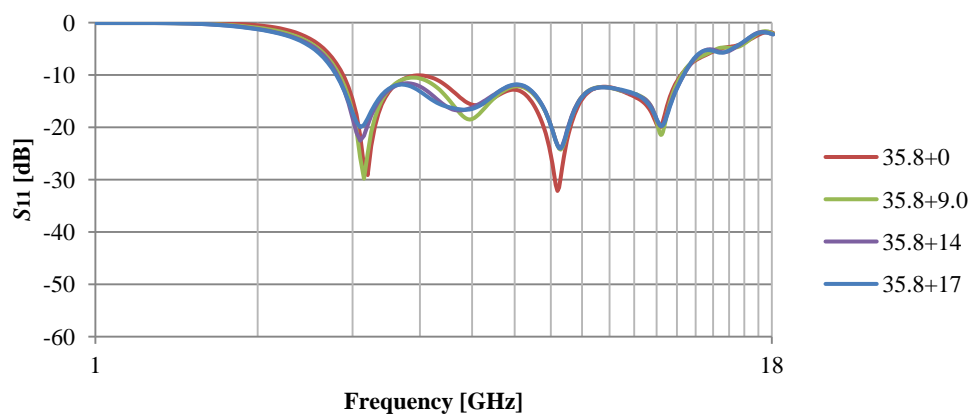


図 3.1.6.6  $G_2$  のパラメータスタディ (反射特性)

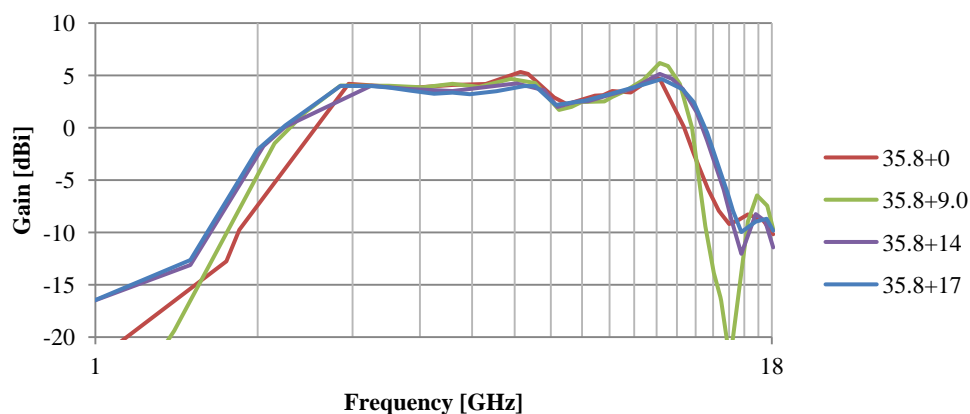


図 3.1.6.7  $G_2$  のパラメータスタディ (利得特性)

## $G_1$ の効果 :

$G_1$  を図 3.1.6.8 のように変化させた時の反射特性および利得特性の変化を図 3.1.6.9, 3.1.6.10 および 3.1.6.11, 3.1.6.12 に示す. 窓枠の横側  $G_1$  は  $G_1=10.8$  mm すなわち, パッチの高さから大きく特性が変化した.

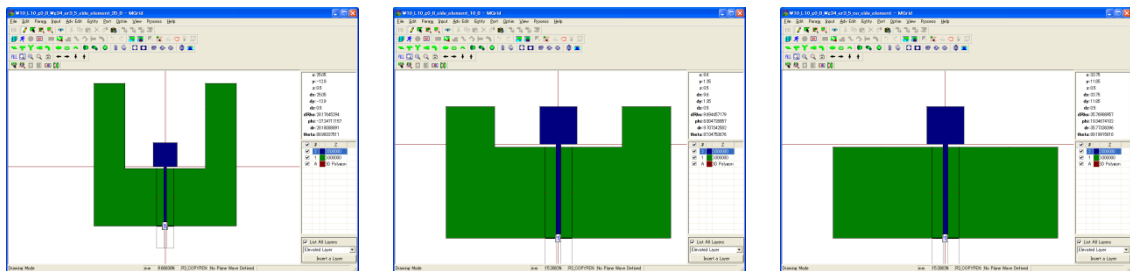


図 3.1.6.8  $G_1$  のパラメータスタディ

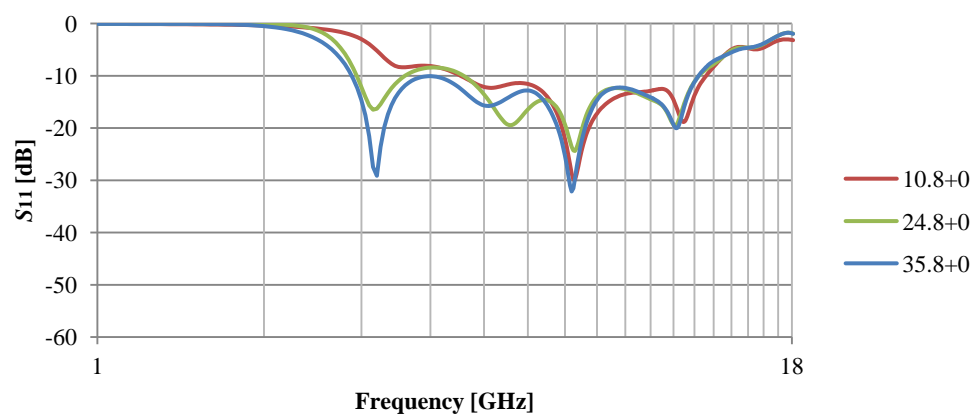


図 3.1.6.9  $G_1$  (35.8 mm→10.8 mm) のパラメータスタディ (反射特性)

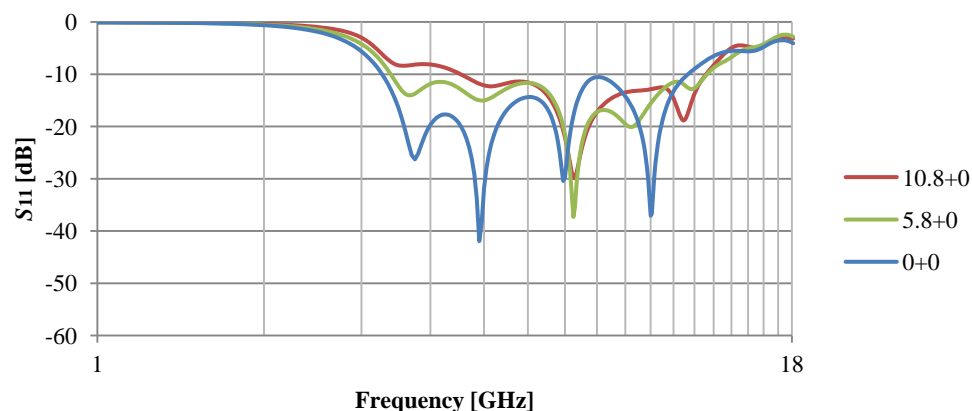


図 3.1.6.10  $G_1$  (10.8 mm→0 mm) のパラメータスタディ (反射特性)

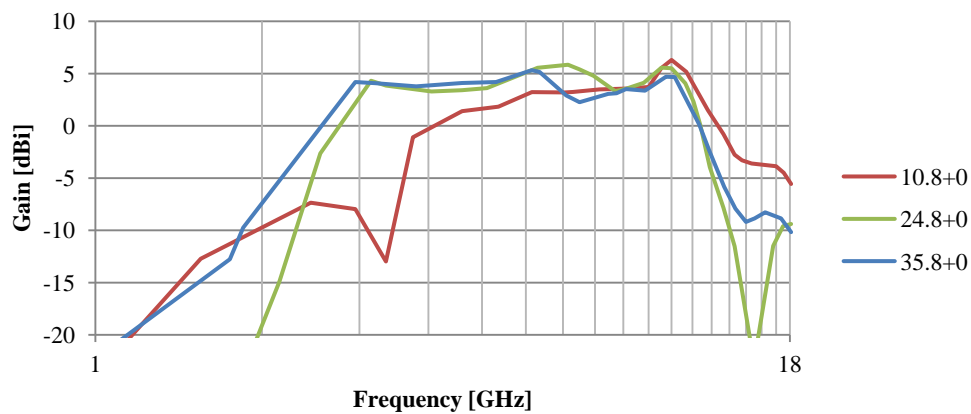


図 3.1.6.11  $G_1$  (35.8 mm→10.8 mm)のパラメータスタディ (利得特性)

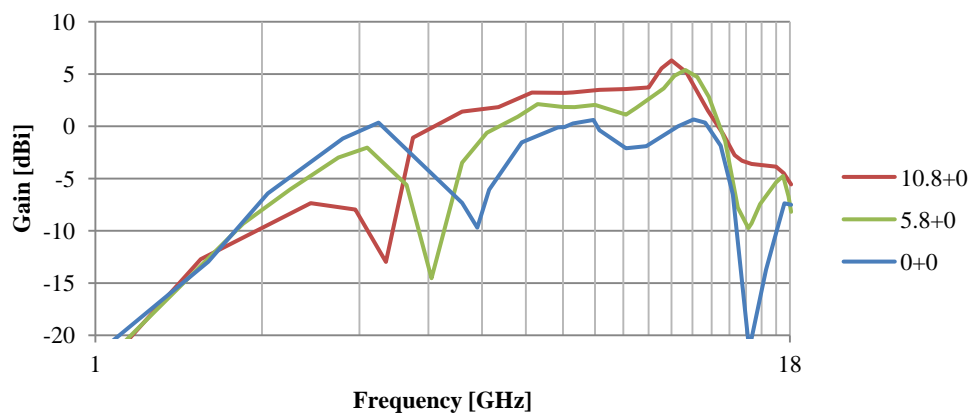


図 3.1.6.12  $G_1$  (10.8 mm→0 mm)のパラメータスタディ (利得特性)

$G_1=0$  mm の反射特性は良いが、利得特性は悪い．図 3.1.6.13 のように裏面グラウンド面における大部分の電流が打ち消しあう方向に流れているためである．

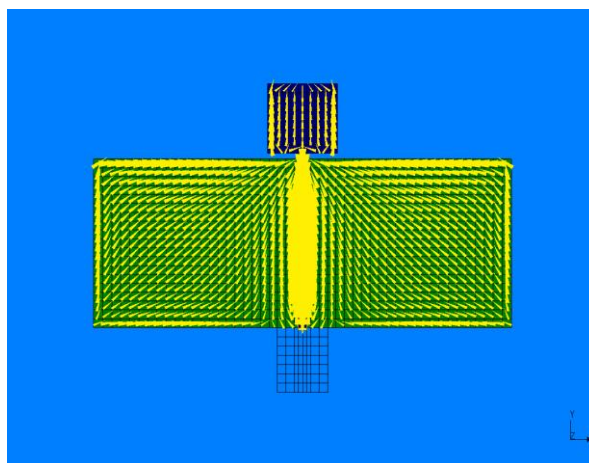


図 3.1.6.13 ( $G_1=0$  mm)アンテナの第 1 の谷における電流密度分布

## $W_s$ の変化 :

$W_s$  を図 3.1.6.14 のように変化させた時の反射特性および利得特性の変化を図 3.1.6.15, 3.1.6.16 に示す. 幅が狭くなるにつれ, 第一の谷の周波数は高域側にシフトしたが, 反射・利得特性ともに大きな変化は見られなかった.

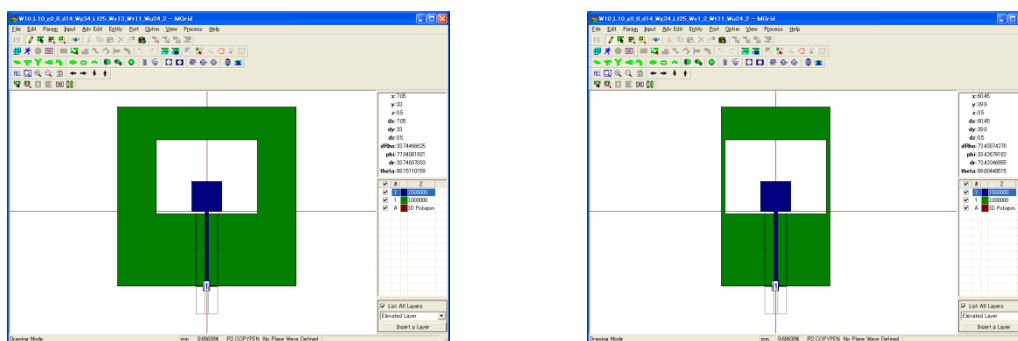


図 3.1.6.14  $W_s$  のパラメータスタディ

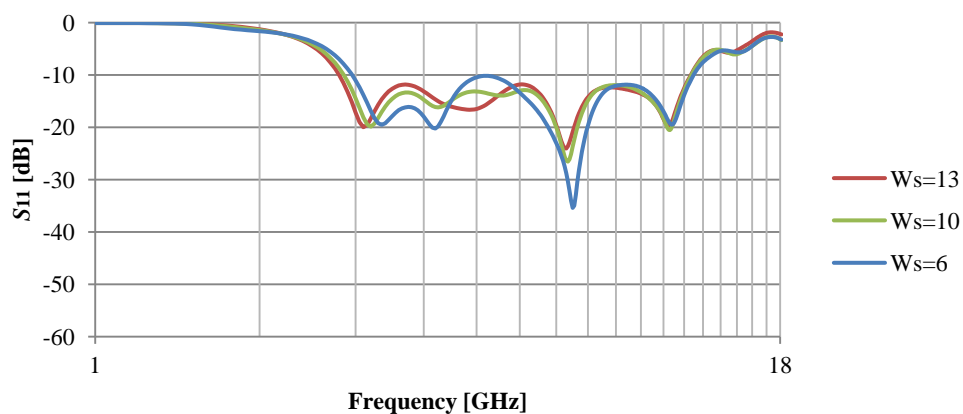


図 3.1.6.15  $W_s$  のパラメータスタディ(反射特性)

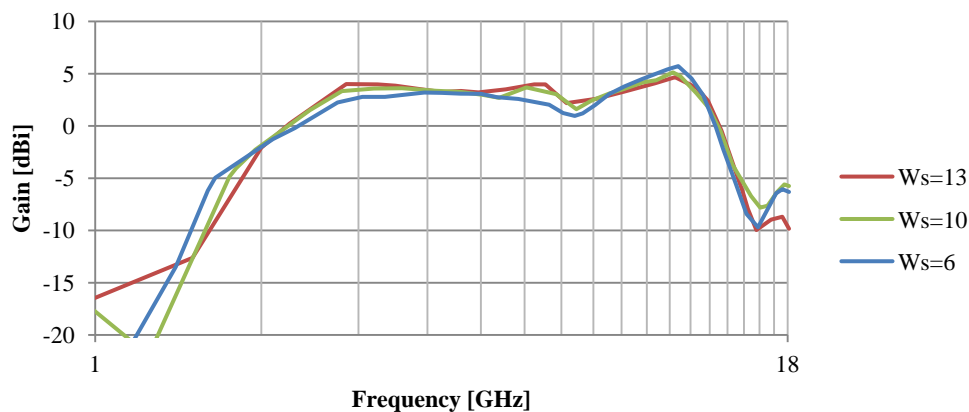


図 3.1.6.16  $W_s$  のパラメータスタディ(利得特性)

## $W_t$ の変化 :

$W_t$  を図 3.1.6.17 のように変化させた時の反射特性および利得特性の変化を図 3.1.6.18, 3.1.6.19 に示す. 反射・利得特性ともに大きな変化は見られなかった.

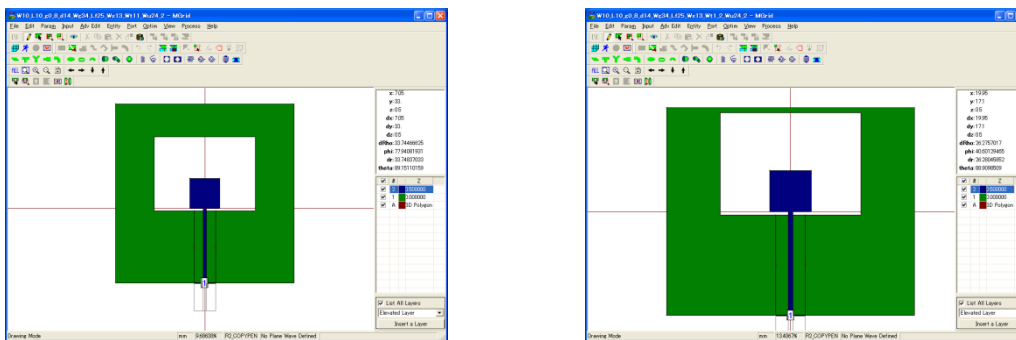


図 3.1.6.17  $W_t$  のパラメータスタディ

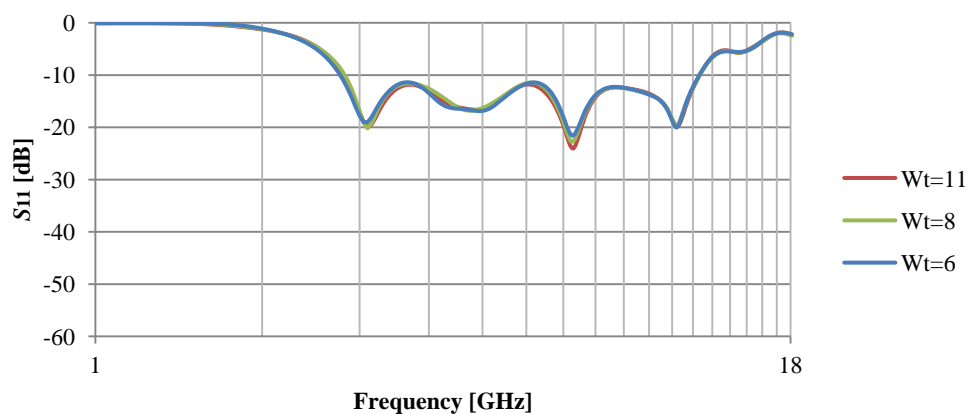


図 3.1.6.18  $W_t$  のパラメータスタディ (反射特性)

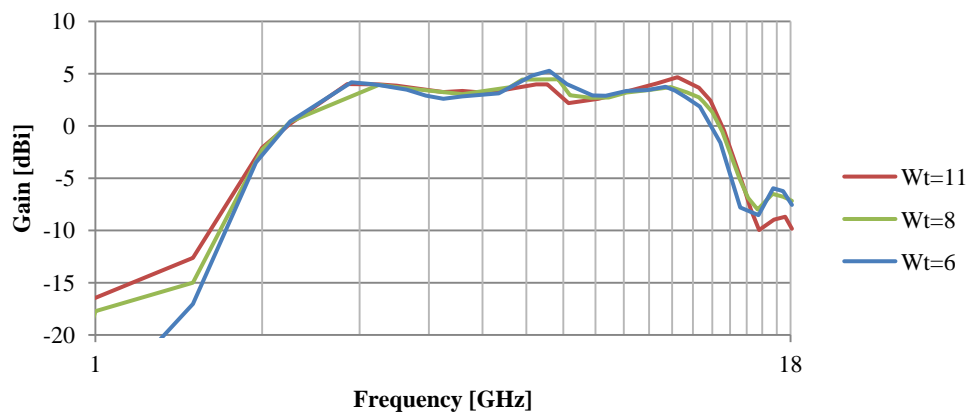


図 3.1.6.19  $W_t$  のパラメータスタディ (利得特性)



## $L_f$ の変化：

$L_f$  を図 3.1.6.20 のように変化させた時の反射特性および利得特性の変化を図 3.1.6.21, 3.1.6.22 に示す． $L_f$  が短くなるにつれ第 1 の谷が高域シフトするが，高域側の第 5 の谷は変化しなかった．Gain 特性には大きな変化なし．

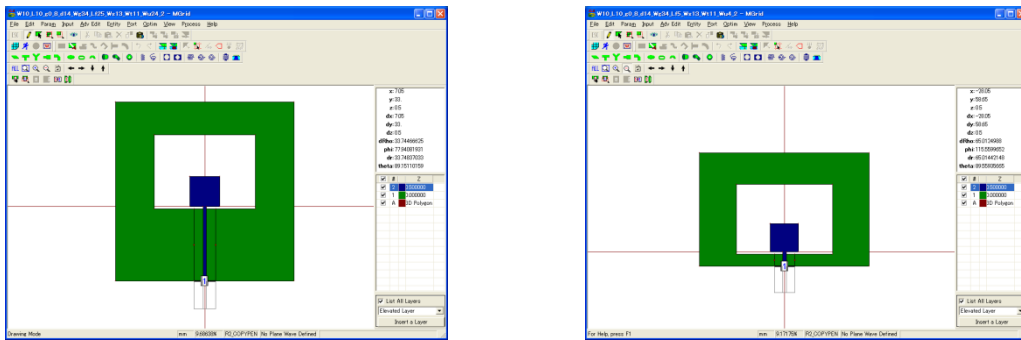


図 3.1.6.20  $L_f$  のパラメータスタディ

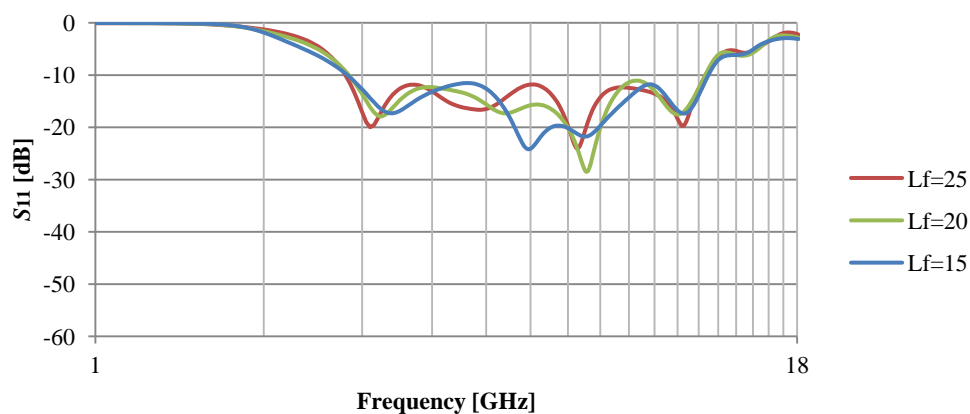


図 3.1.6.21  $L_f$  のパラメータスタディ（反射特性）

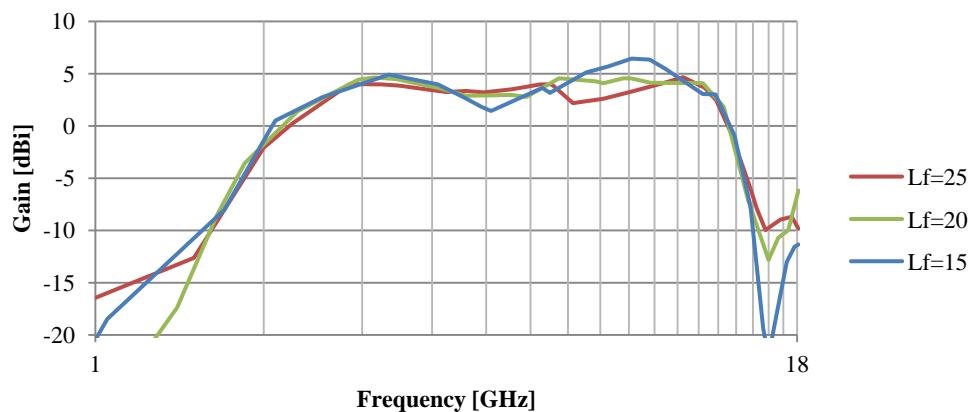


図 3.1.6.22  $L_f$  のパラメータスタディ（利得特性）

### 3.1.7 基板の比誘電率の効果

基板の比誘電率のパラメータスタディを行った．比誘電率に伴いマイクロストリップライン(MSL)の幅も特性インピーダンスが  $50\ \Omega$  となるように変化させた．基準アンテナの比誘電率が 3.5 と 1.0 の場合を比較した．パラメータスタディの結果，比誘電率 3.5 の場合の方が各谷が低域側に現れたが，その変化は波長短縮率  $\sqrt{\epsilon_r}$  と比べるとかなり小さい変化だった．

MSL の概形を図 3.1.7.1 に示す．基板の比誘電率  $\epsilon_r$  が 1.0 のときの，MSL の幅  $W_f$  が 2.2 mm, 2.4~2.5 mm (長さ  $L_f = 25\text{ mm}$ ) の特性インピーダンスを図 3.1.7.2 に示す．図 3.1.7.2 より  $W_f = 2.5\text{ mm}$  が最も  $50\ \Omega$  線路に適していることが分かる． $W_f = 2.5\text{ mm}$  の  $S_{11}$  特性を図 3.1.7.3 に，実効比誘電率特性を図 3.1.7.4 に示す．なお，図 3.1.7.2~3.1.7.4 までの特性は無限グラウンド計算によるものである．

無限グラウンド計算による基板の比誘電率が 3.5 および 1 のときの反射特性および利得特性をそれぞれ図 3.1.7.5, 3.1.7.6 に，有限グラウンド計算の場合を 3.1.7.7, 3.1.7.8 に示す．反射特性の各谷の周波数を  $1/4$  波長， $1/2$  波長，1 波長に換算した数値とそのときの  $\epsilon_r$  の数値(1.0, 3.5)との対応を表 3.1.7.1, 3.1.7.2 に示す．

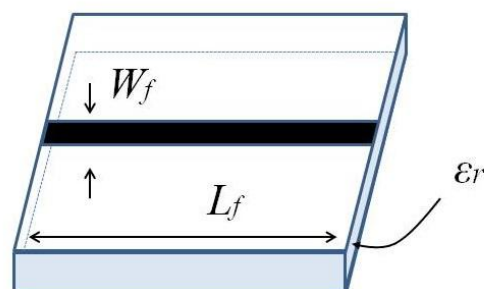


図 3.1.7.1 MSL の概形

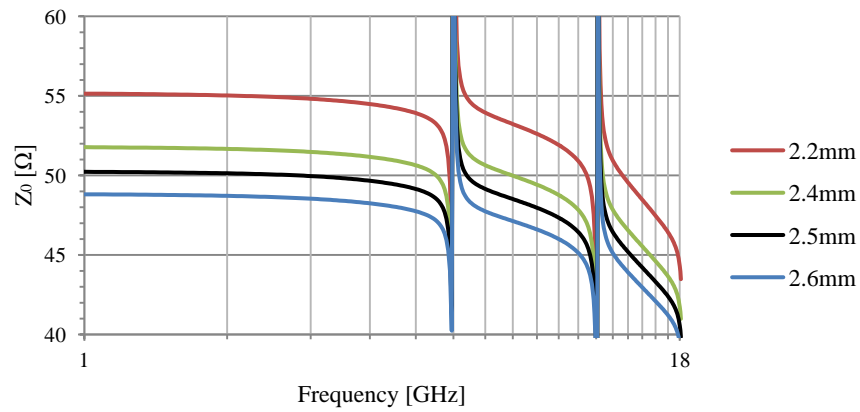


図 3.1.7.2 特性インピーダンス ( $W_f=2.2$  mm, 2.4~2.6 mm 比較)

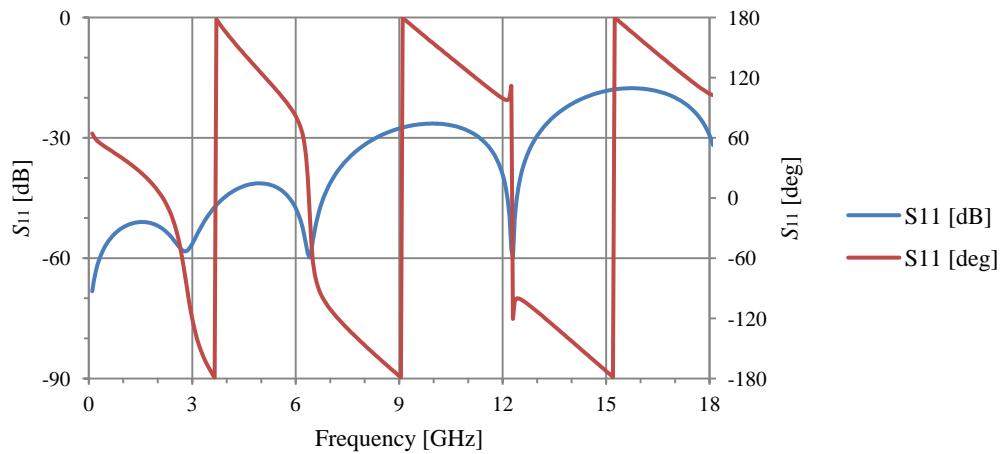


図 3.1.7.3 MSL ( $W_f=2.5$  mm)の  $S_{11}$  特性

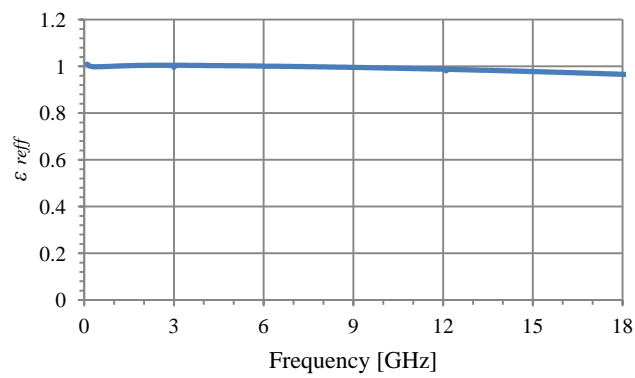


図 3.1.7.4 MSL ( $W_f=2.5$  mm)の実効比誘電率  $\epsilon_{reff}$

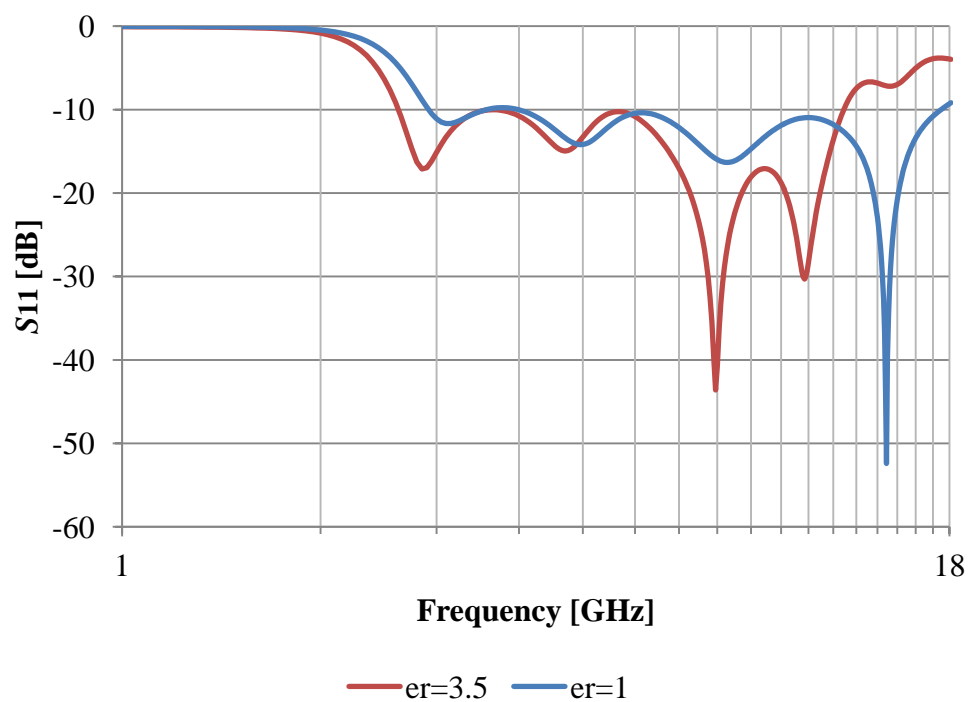


図 3.1.7.5 無限グラウンド計算による  $\epsilon_r$  のパラメータスタディ (反射特性)

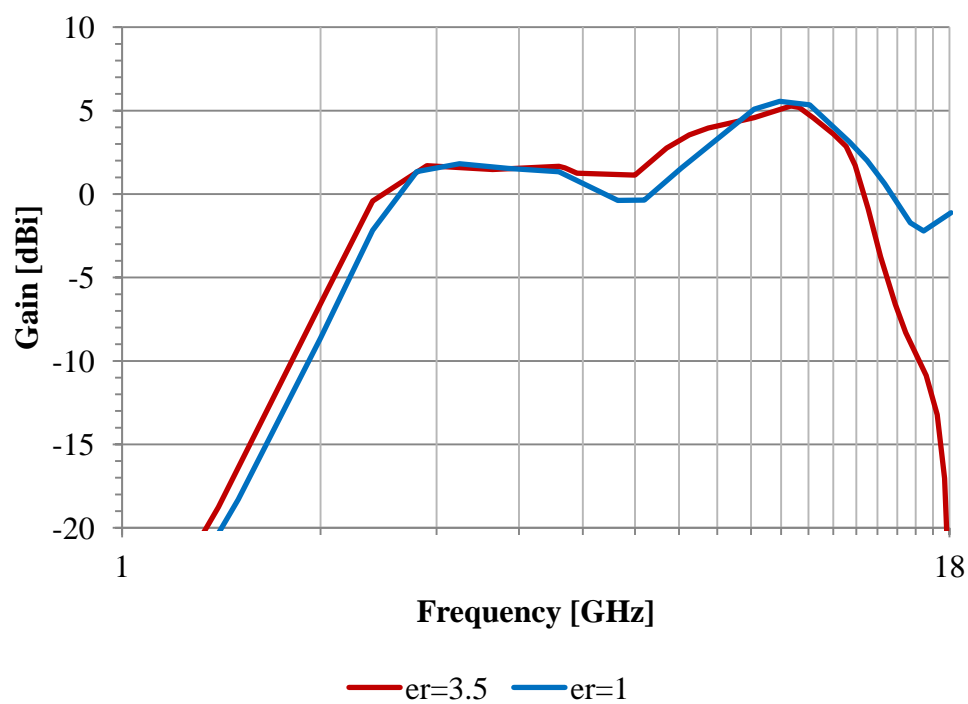


図 3.1.7.6 無限グラウンド計算による  $\epsilon_r$  のパラメータスタディ (利得特性)

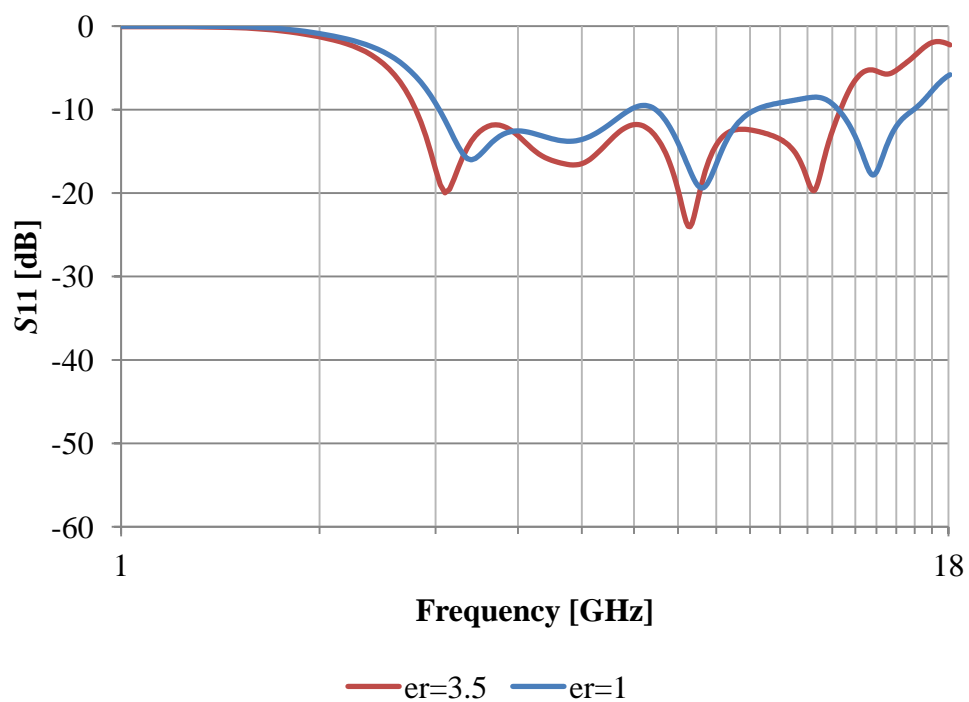


図 3.1.7.7 有限グラウンド計算による  $\epsilon_r$  のパラメータスタディ (反射特性)

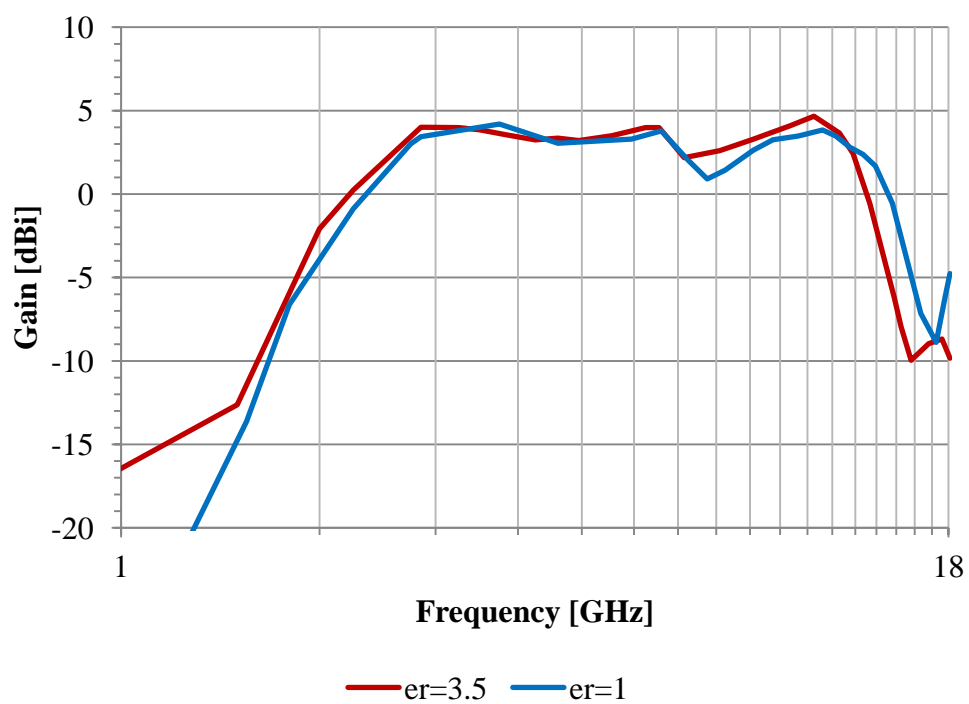


図 3.1.7.8 有限グラウンド計算による  $\epsilon_r$  のパラメータスタディ (利得特性)

表 3.1.7.1 各谷の周波数と対応する波長（無限グランド計算： $\epsilon_r$ ）※波長[mm]

$\epsilon_r = 3.5$	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
1st	2.85	105.3	52.6	26.3
2nd	4.7	63.8	31.9	16.0
3rd	7.95	37.7	18.9	9.4
4th	10.85	27.6	13.8	6.9
5th	14.65	20.5	10.2	5.1
$\epsilon_r = 1$	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
1st	3.1	96.8	48.4	24.2
2nd	4.95	60.6	30.3	15.2
3rd	8.3	36.1	18.1	9.0
4th	14.45	20.8	10.4	5.2

表 3.1.7.2 各谷の周波数と対応する波長（有限グランド計算： $\epsilon_r$ ）※波長[mm]

$\epsilon_r = 3.5$	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
1st	3.1	96.8	48.4	24.2
2nd	4.85	61.9	30.9	15.5
3rd	7.3	41.1	20.5	10.3
4th	11.25	26.7	13.3	6.7
5th	14.5	20.7	10.3	5.2
$\epsilon_r = 1$	Freq [GHz]	1 波長	1/2 波長	1/4 波長
1st	3.4	88.2	44.1	22.1
2nd	4.8	62.5	31.3	15.6
3rd	7.6	39.5	19.7	9.9
4th	13.85	21.7	10.8	5.4

## 3.2 放射パターン

基準アンテナの各谷の H 面および E 面の放射パターンを，無限グラウンド計算の場合を図 3.2.1~3.2.5 に，有限グラウンド計算の場合を図 3.2.6~3.2.10 に示す．なお，H 面は図 2.1.1 の Z-X 面，E 面は Y-Z 面である．赤は主偏波，青は交差偏波，黒はそれらの合成ベクトルである．有限グラウンド計算と無限グラウンド計算で大きな違いは見られなかった．これはある程度のグラウンド面を確保すれば利得が確保できることを示している．また，第 1~4 の谷まで無指向性だが，第 5 の谷では放射パターンが割れてアンテナ正面方向の利得が小さくなっている．

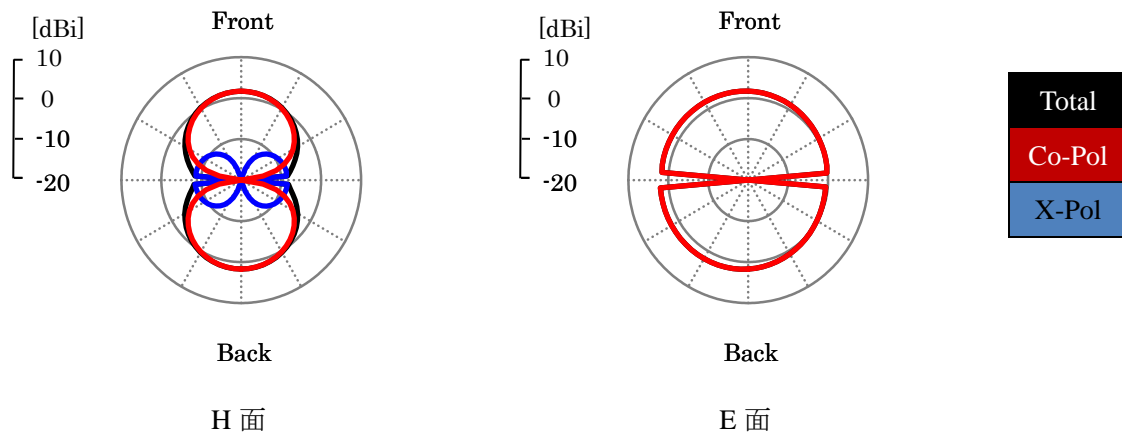


図 3.2.1 無限グラウンド計算による放射パターン（第 1 の谷）

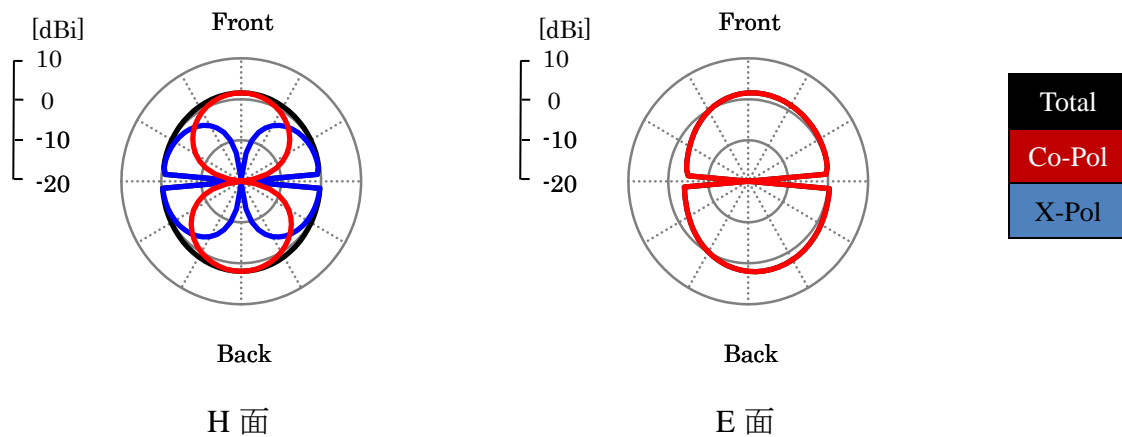


図 3.2.2 無限グラウンド計算による放射パターン（第 2 の谷）

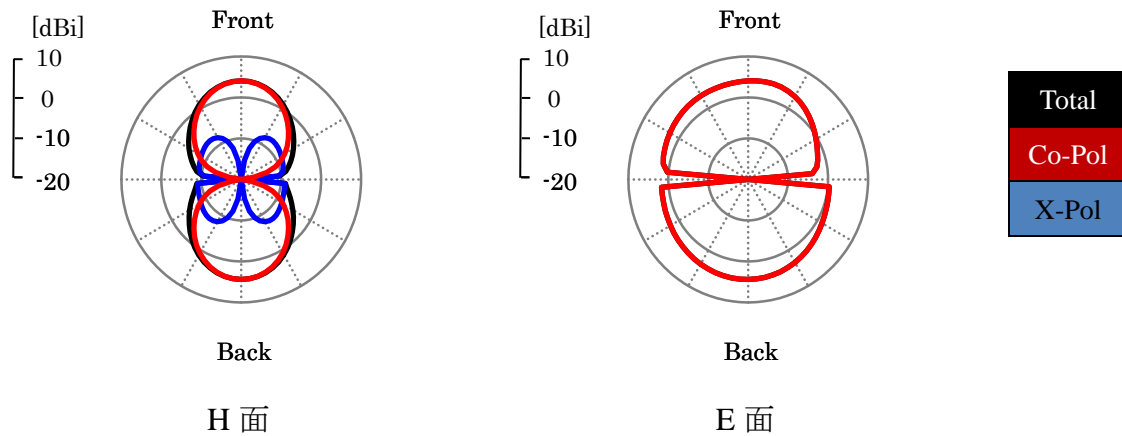


図 3.2.3 無限グラウンド計算による放射パターン (第 3 の谷)

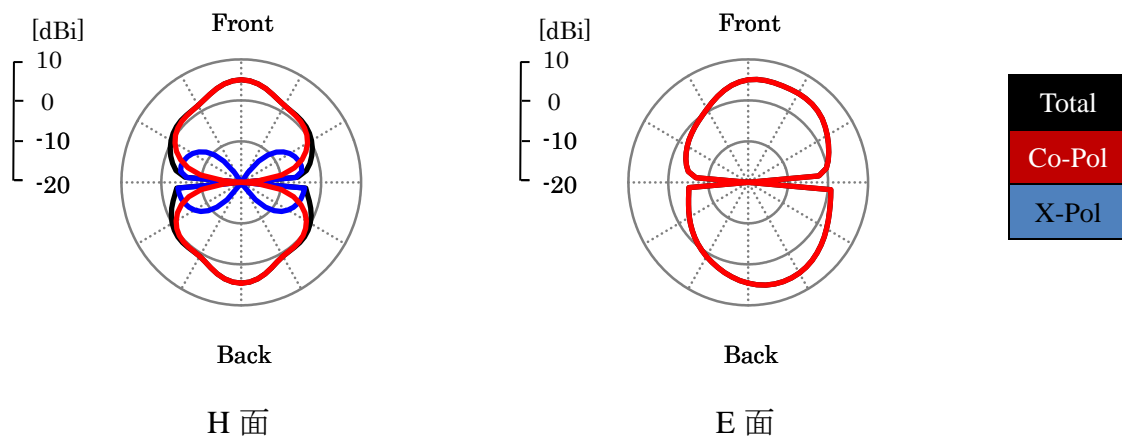


図 3.2.4 無限グラウンド計算による放射パターン (第 4 の谷)

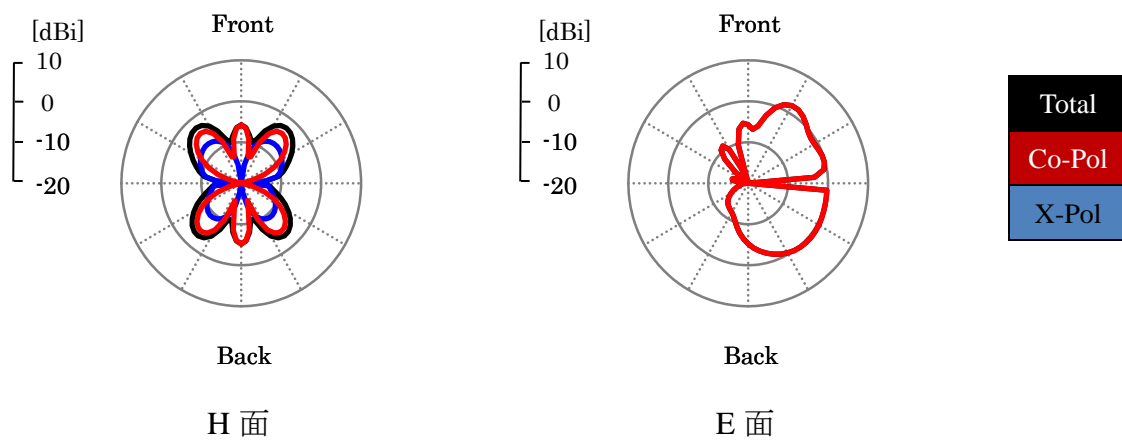


図 3.2.5 無限グラウンド計算による放射パターン (第 5 の谷)



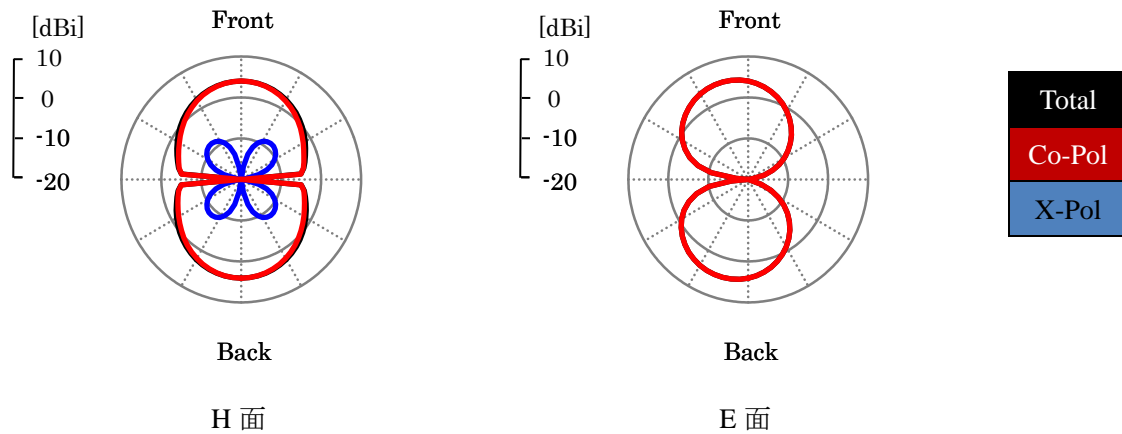


図 3.2.6 有限グラウンド計算による放射パターン（第 1 の谷）

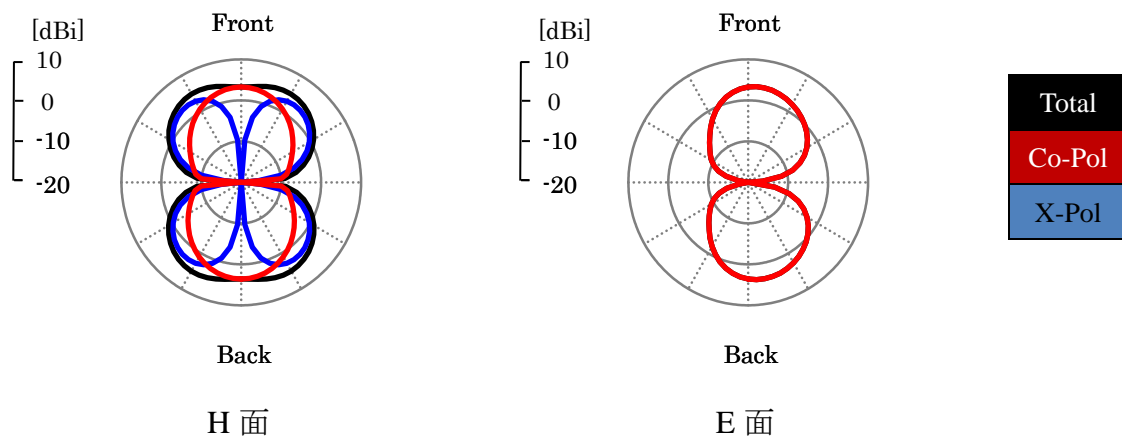


図 3.2.7 有限グラウンド計算による放射パターン（第 2 の谷）

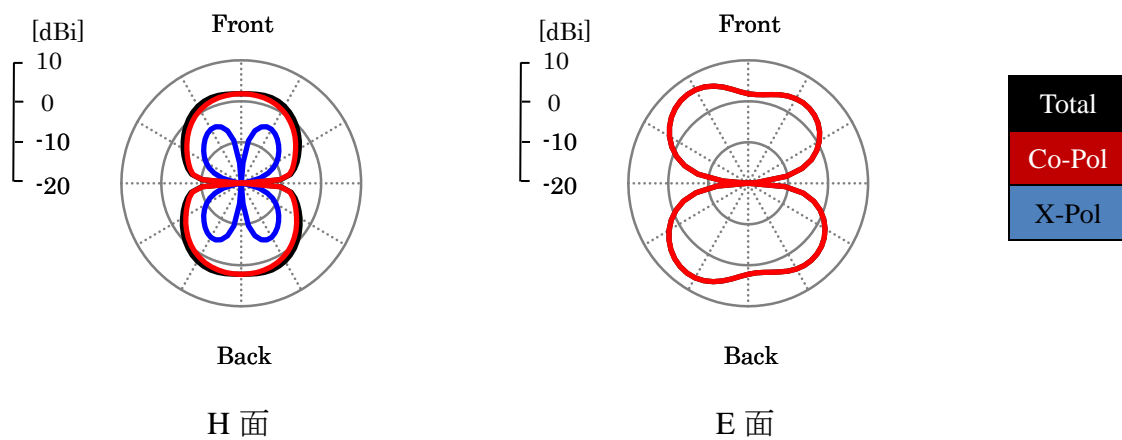


図 3.2.8 有限グラウンド計算による放射パターン（第 3 の谷）

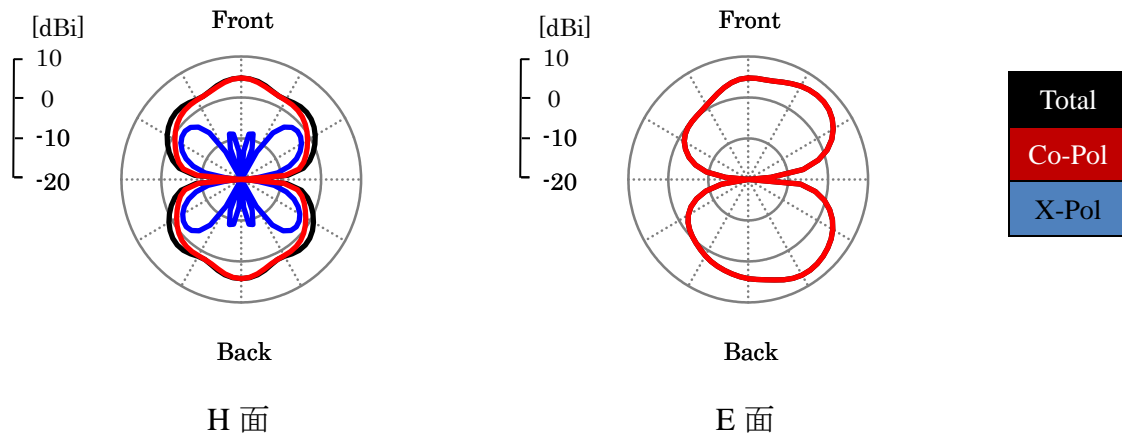


図 3.2.9 有限グラウンド計算による放射パターン (第 4 の谷)

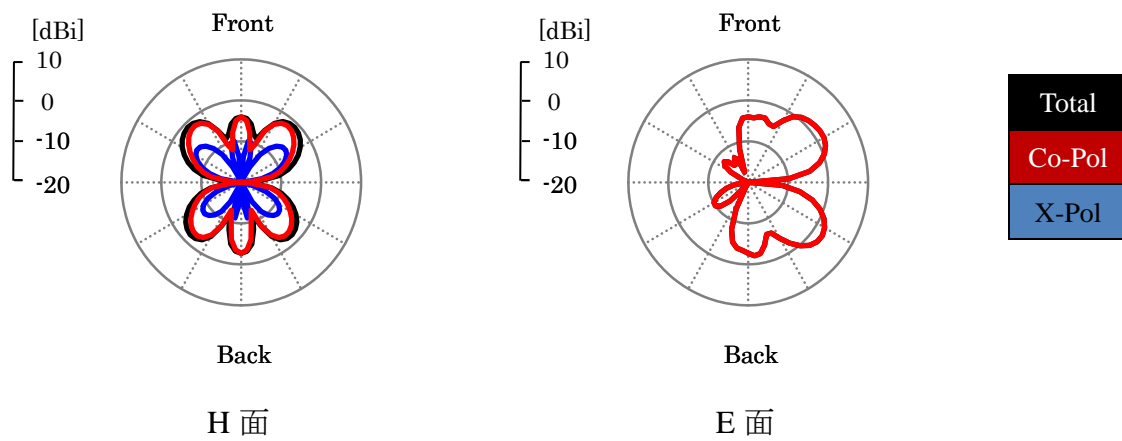
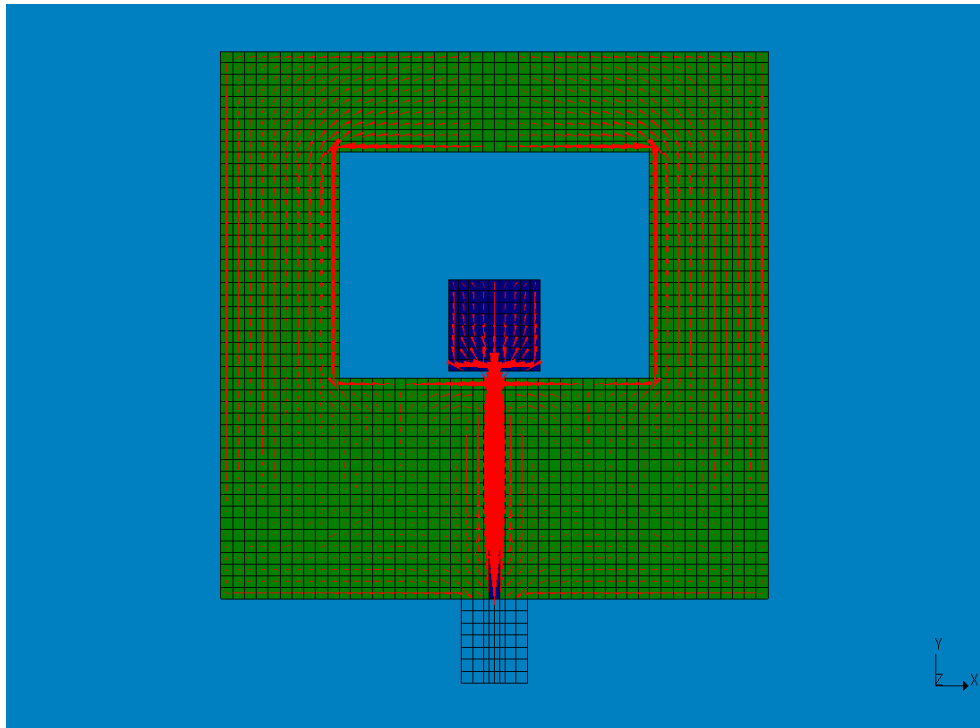


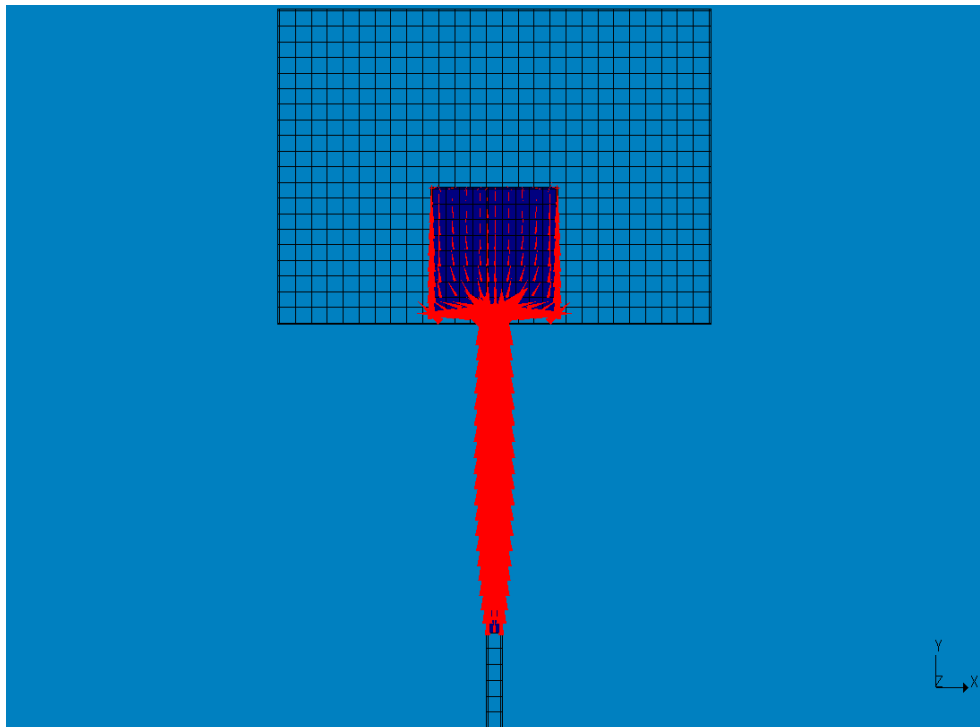
図 3.2.10 有限グラウンド計算による放射パターン (第 5 の谷)

### 3.3 電流密度分布

基準アンテナの各谷の電流密度分布を有限グランド計算および無限グランド計算の場合を図 3.3.1~3.3.5 に示す．第 1 の谷では，図 3.3.1 (a)のモデルに示すように表面パッチから裏面グランド導体に渡って電流が分布している．これらの電流分布より，アンテナが表面および裏面との間の結合を介在して，連動して振る舞っていることが分かる．また，第 3 の谷では，表面パッチが単体で共振しているパターンを有している．このことは，本アンテナが「表面パッチ」「裏面グランド導体」「表面パッチ+裏面グランド導体」がそれぞれ共振して機能していることを示す．特に，図 3.3.5 の第 5 の谷では，表面パッチの電流密度分布が縦方向に電流の向きが相反するパターン（高次モード）を有している．そのため，第 5 の谷の周波数は正面で観測した高域側の利得特性の大きな減衰と対応しており，図 2.1.4 に示すアンテナの利得周波数の上限を与えることになる．

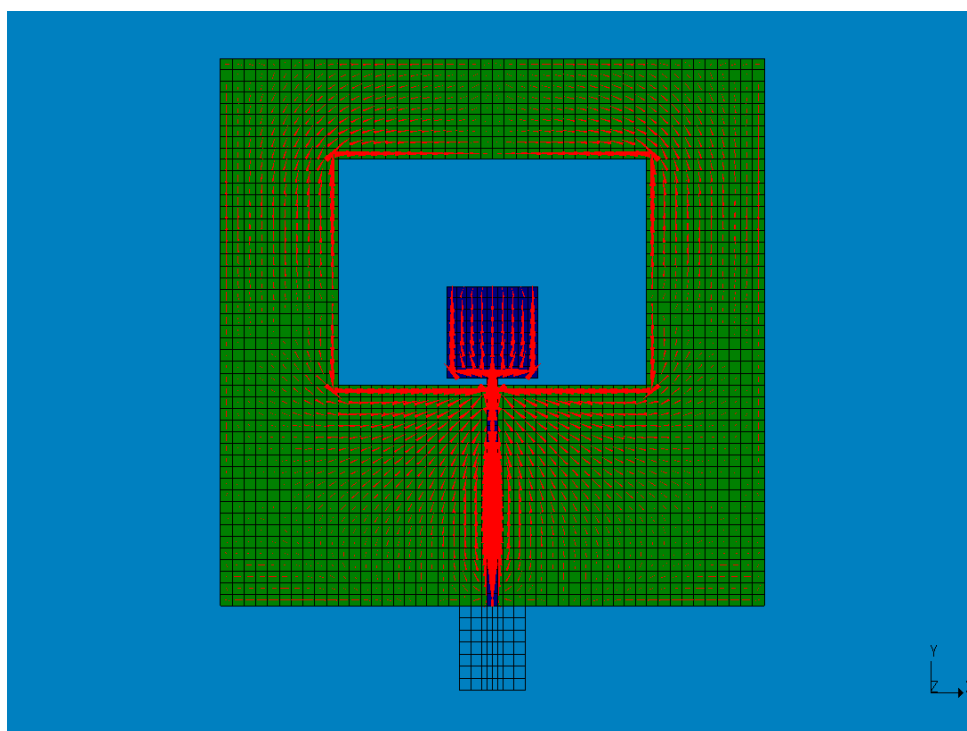


(a) 有限グランド計算（第 1 の谷：3.10 GHz）

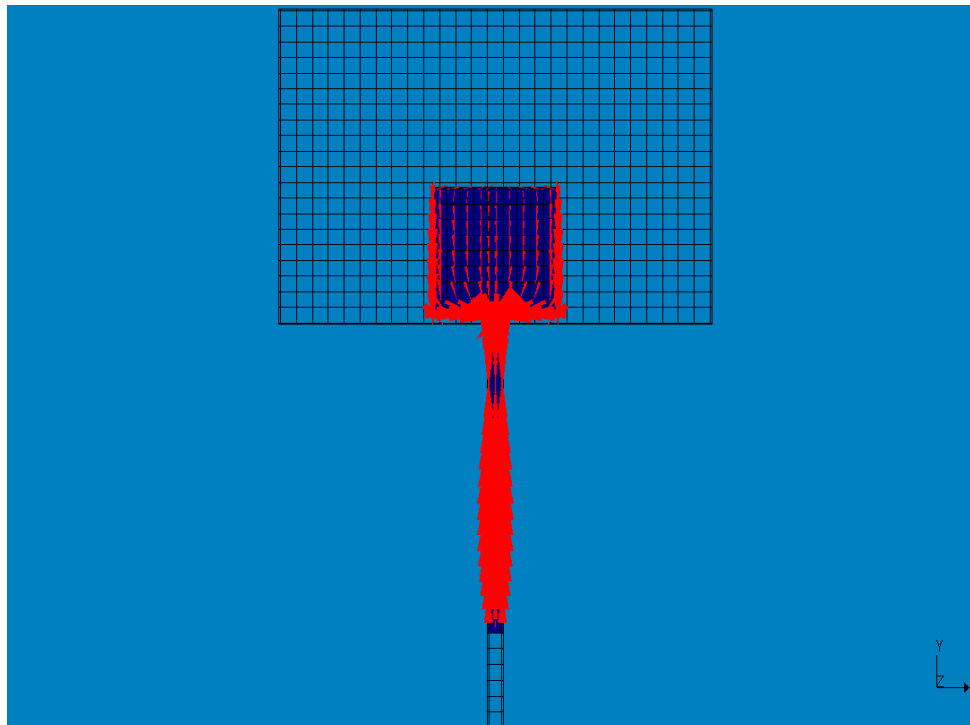


(b) 無限グランド計算（第 1 の谷：2.85 GHz）

図 3.3.1 第 1 の谷における電流密度分布

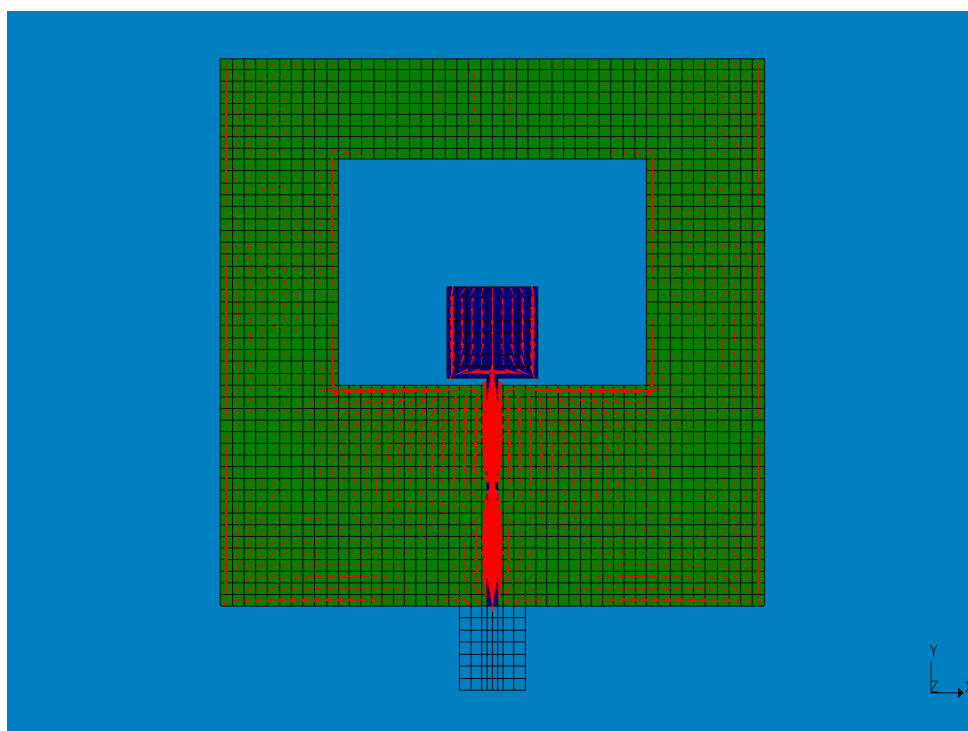


(a) 有限グランド計算（第2の谷：4.85 GHz）

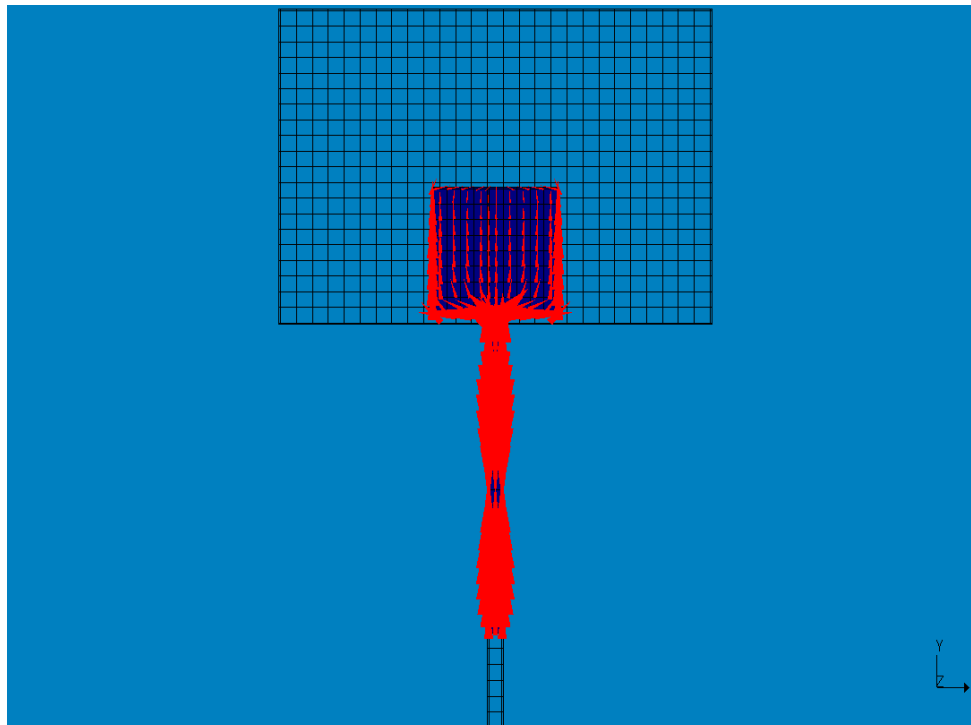


(b) 無限グランド計算（第2の谷：4.70 GHz）

図 3.3.2 第2の谷における電流密度分布

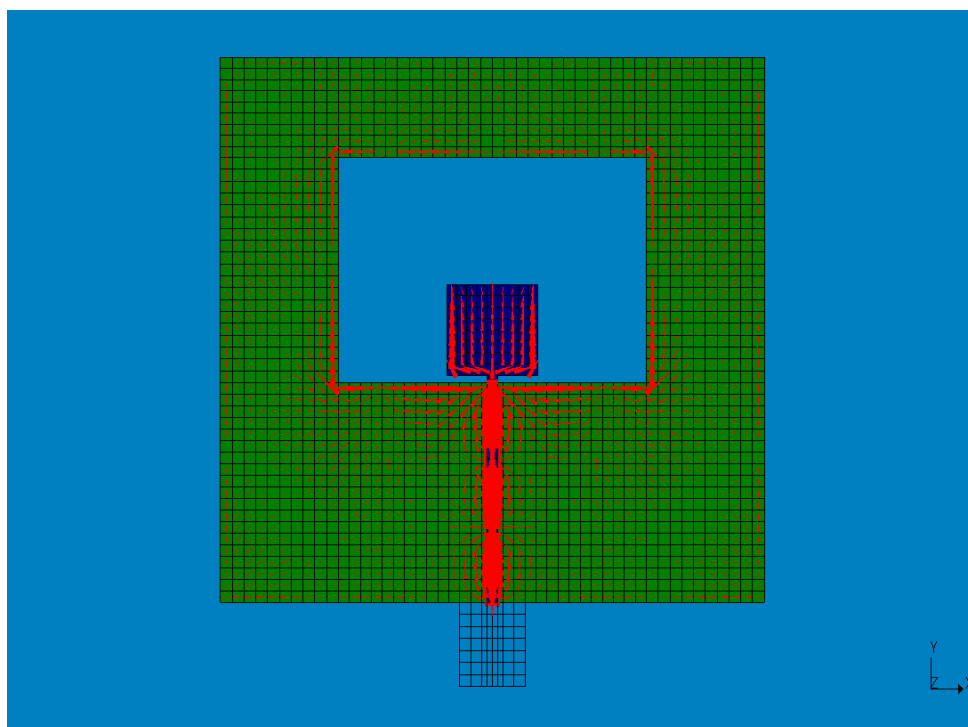


(a) 有限グランド計算（第3の谷：7.30 GHz）

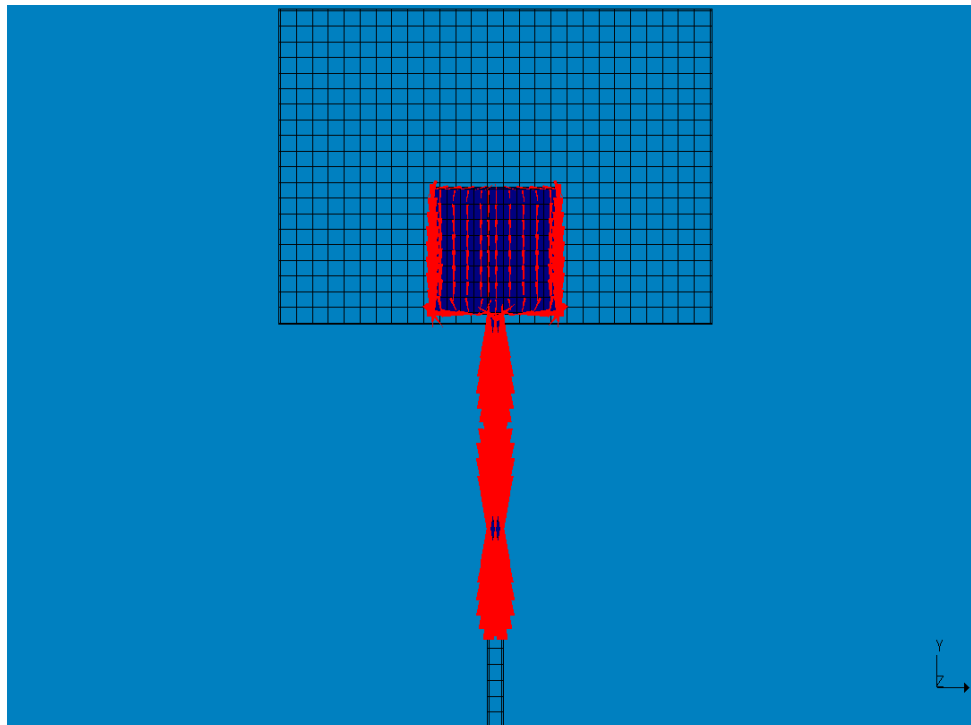


(b) 無限グランド計算（第3の谷：7.95 GHz）

図 3.3.3 第3の谷における電流密度分布

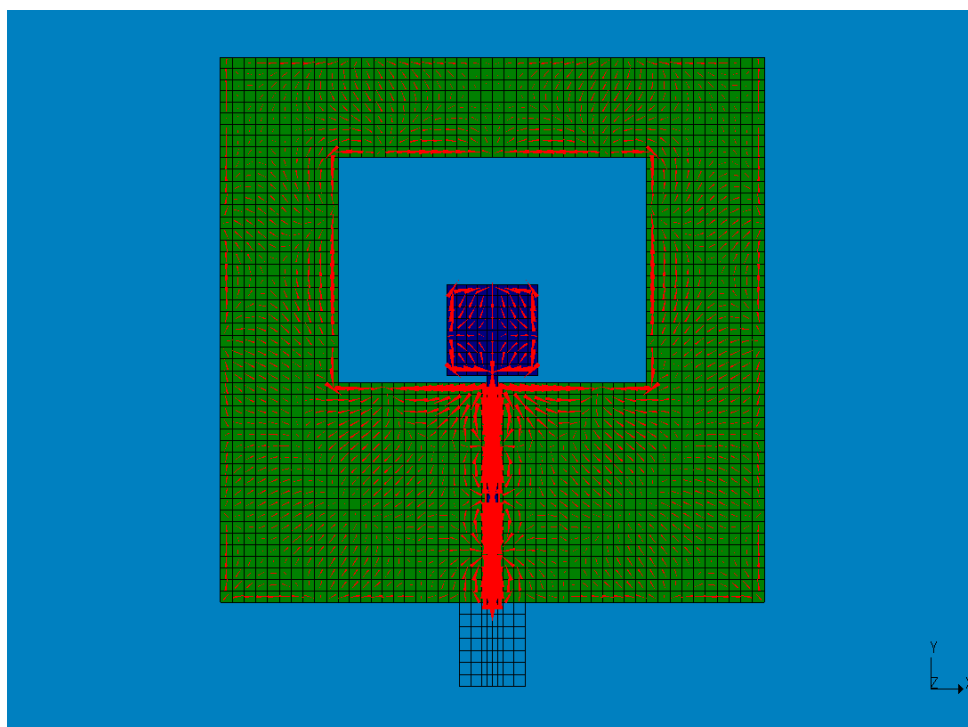


(a) 有限グランド計算（第4の谷：11.25 GHz）

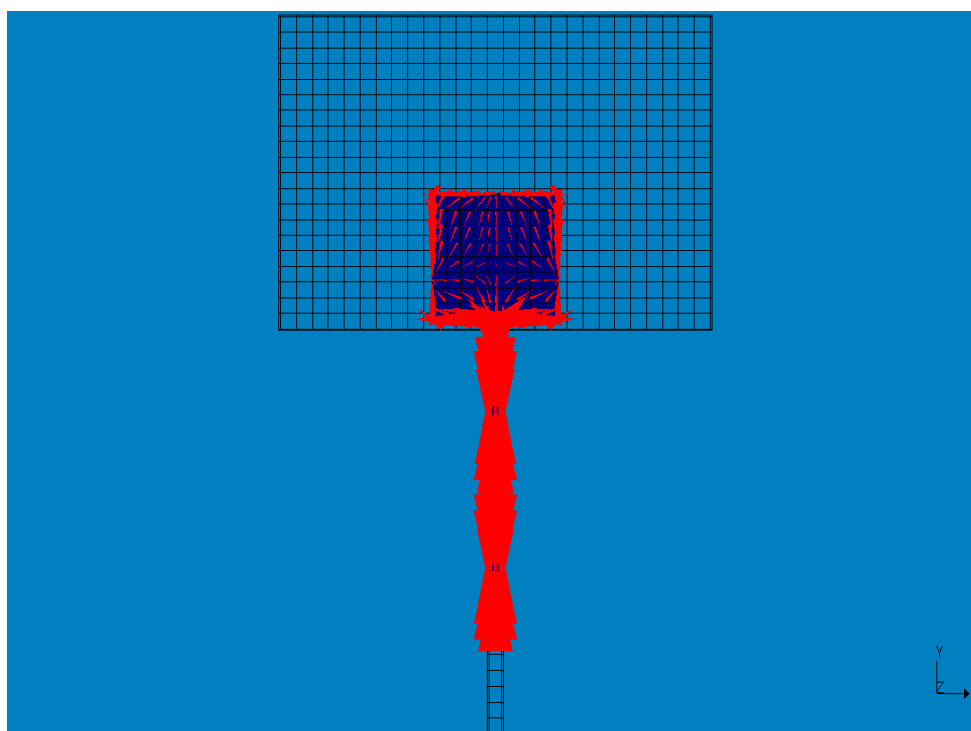


(b) 無限グランド計算（第4の谷：10.85 GHz）

図 3.3.4 第4の谷における電流密度分布



(a) 有限グランド計算（第5の谷：14.50 GHz）



(b) 無限グランド計算（第5の谷：14.65 GHz）

図 3.3.5 第5の谷における電流密度分布



### 3.4 アンテナの入力インピーダンス

本アンテナの給電点を図 3.4.1 に示す．本アンテナの給電点は表面パッチと給電線との接合点である．無限グラウンド計算による給電点における  $S_{11}$  特性および入力インピーダンス  $Z_{in}$  特性をそれぞれ図 3.4.2, 3.4.3 に示す．また，給電点におけるスミスチャートを図 3.4.4 に示す．

図 3.4.3 に示すように，第 1 の谷より低域側では  $\angle Z_{in} = -90^\circ$  となっていることから，各共振器がオープンスタブとして機能していることが分かる．また，第 3 の谷以降で入力インピーダンスが容量性から誘導性に変化していることから，第 3 の谷で共振していることが分かる．この結果と 3.3 節の図 3.3.3 の第 3 の谷における電流密度分布，第 3 の谷の周波数を  $1/4$  波長に変換すると約 10 mm であることから，第 3 の谷は表面パッチ単体の  $1/4$  波長共振であることを示している．表面パッチの  $1/4$  波長共振である第 3 の谷以降から放射パターンが歪になり始める（節 3.2 参照）．

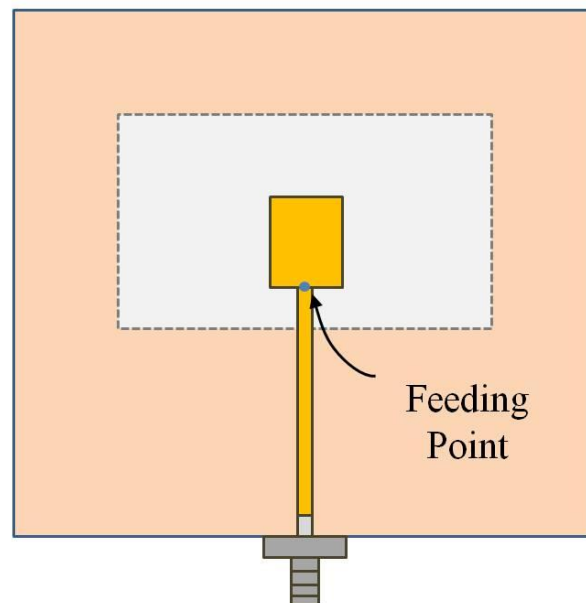


図 3.4.1 アンテナの給電点

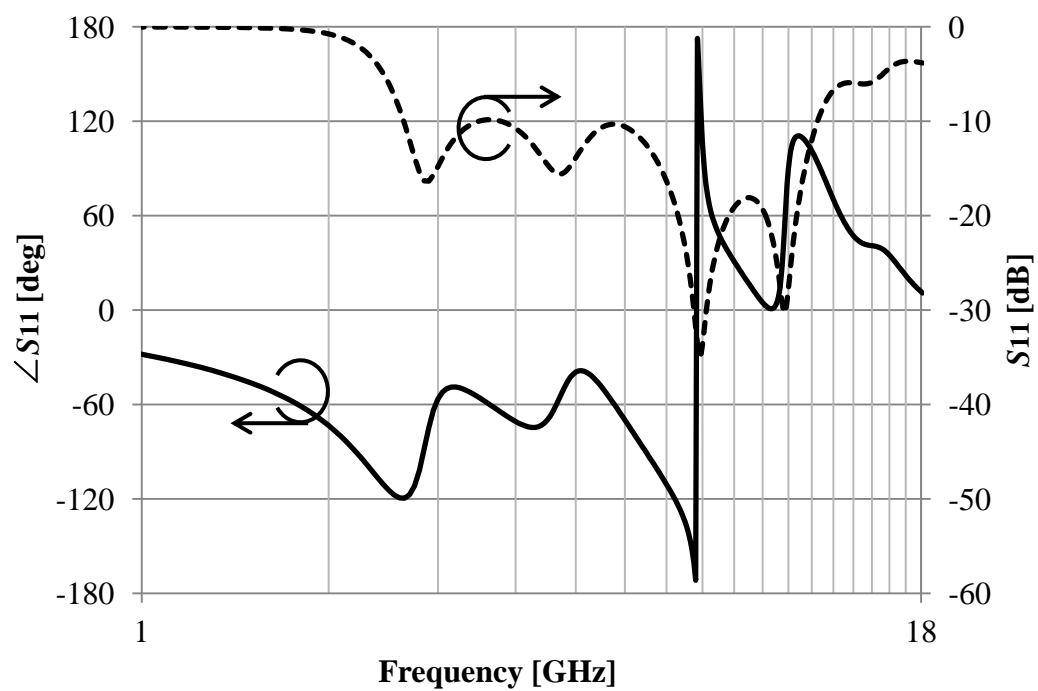


図 3.4.2 給電点における反射特性（無限グランド計算）

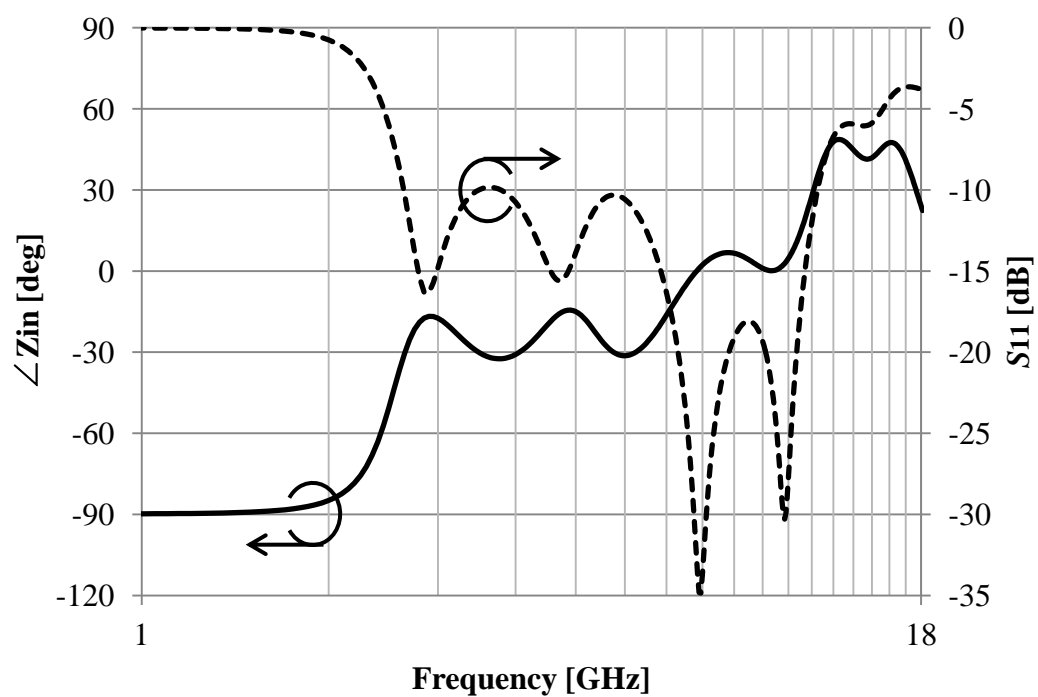


図 3.4.3 給電点における入力インピーダンス（無限グランド計算）

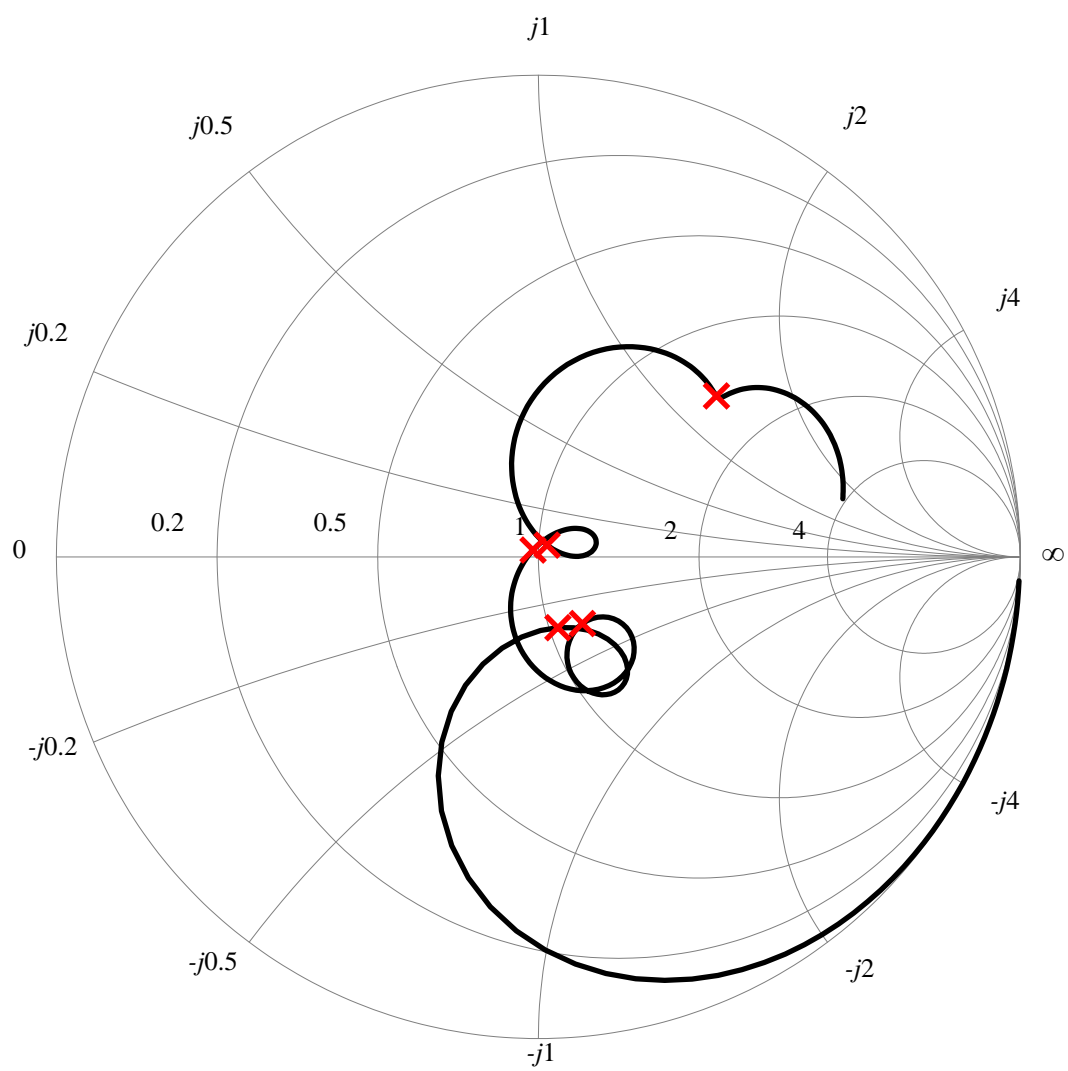


図 3.4.4 無限グラウンド計算による基準アンテナのスミスチャート  
 ※ 図中のマークは $S_{11}$ 特性の谷の周波数

## 第 4 章

# アンテナの等価回路モデルと考察

### 4.1 アンテナの等価回路モデル

3 章で示したシミュレーション結果に併せて、アンテナの等価回路モデルを試みた。その等価回路モデル 4.1.1 に示す。表面パッチと裏面グランド導体をそれぞれオープスタブ共振器として表した。裏面グランド導体の共振器には容量性結合により給電している。給電点は  $50\ \Omega$  線路の終点、すなわち表面パッチと給電線の接合部である。それぞれのアンテナエレメントに放射抵抗があると予測できるが、放射抵抗についてはシミュレーションから直接得られていない。したがって、共振条件としてはリアクタンス部分に注目して、定性的な説明を行った。

表面と裏面の共振器間に結合があることで、図 4.1.2 に示すような表面と裏面の共振器が 1 つのアンテナエレメントとして機能する周波数（例：第 1 の谷）がある。そのため、本アンテナは「表面パッチ部」、「裏面グランド導体」、「表面パッチ部と裏面グランド導体」の 3 つのエレメントが機能している。

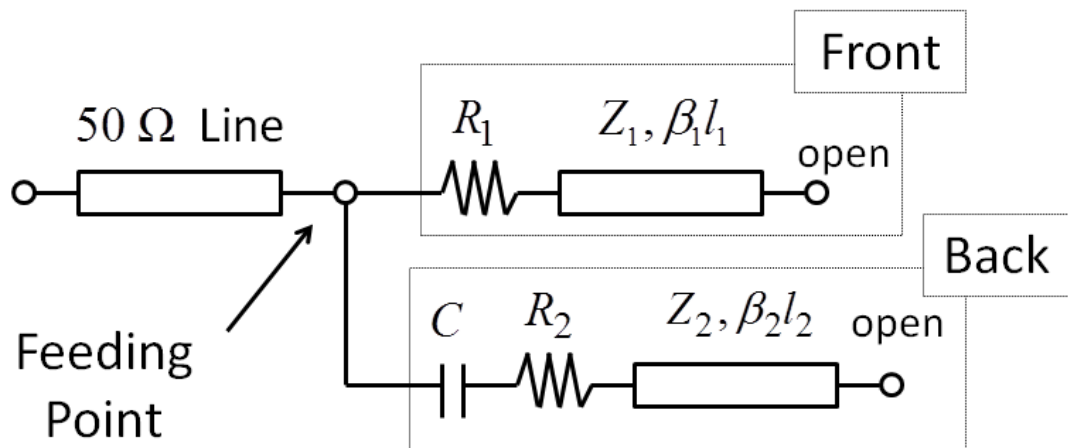


図 4.1.1 アンテナの等価回路モデル

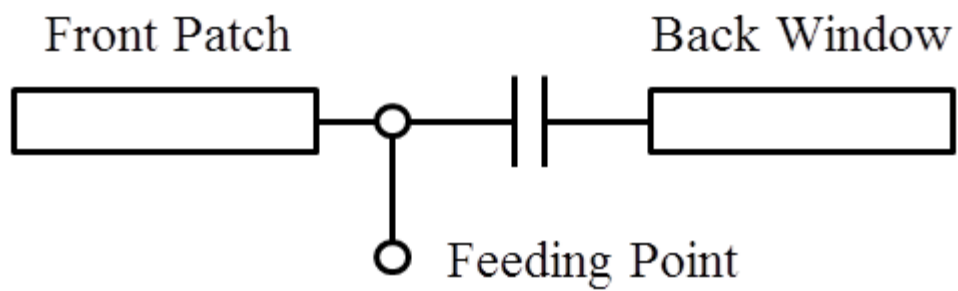


図 4.1.2 第 1 の谷におけるアンテナエレメント

## 4.2 アンテナの上限周波数と下限周波数

反射特性の各谷の特徴を表 4.2.1 に示す．第 1 の谷では表面と裏面の共振器が結合して 1 つのエレメントとして機能していることを示す結果が得られた．第 3, 5 の谷では表面パッチがそれぞれ  $1/4$  波長，半波長で機能している．

本アンテナの低域側（下限動作周波数）を決定する要因は第 1 の谷である．第 1 の谷では，表面パッチと裏面グランド導体によるエレメント同士が結合して 1 つのエレメントとして共振する（図 4.1.2, 3.3.1(a) 参照）．

高域側（上限動作周波数）を決定する要因は高次モードである．第 5 の谷における電流密度分布より表面パッチの電流密度分布が縦方向に電流の向きが相反するパターンを有している（図 3.3.5 参照）．そのため，第 5 の谷の周波数は正面で観測した高域側の利得特性の大きな減衰と対応しており，図 2.1.4 および図 3.2.5, 3.2.10 に示すようにアンテナの利得周波数の上限となる．

# まとめ

アンテナの構造を変化させ、反射特性、利得特性、放射パターンおよび電流密度分布の変化を観察するパラメータスタディを行った。動作原理を定性的に説明するための等価回路モデルを立て、パラメータとの一定の関連づけを行った。また、この等価回路モデルと照らし合わせ、各構造パラメータ ( $W, L, g, d, W_g$ ) の効果および基板のパラメータ（基板面積・比誘電率）の効果を検討した。等価回路モデルにより本アンテナの広帯域動作原理の一部であるアンテナの共振条件および結合条件について部分的に解明した。

しかし、等価回路モデルの定量化も含めて、広帯域動作原理の十分な解明には至っていない。現状の問題点として、裏面グランド導体によるエレメントの具体的な部位や、放射抵抗に関して解明ができていない。本研究のアンテナは平面、小型、超広帯域、安定した利得特性といった優れた特性を持っているので、その動作原理の解明は大変有意義である。今後は、アンテナの放射抵抗、共振条件および結合条件を更に解明し、アンテナの構造と一対一で特性を決定できる設計ルールを確立していきたい。

なお、本研究の対外発表は以下の通りである。

- (1) 2014 年 12 月 電子情報通信学会 マイクロ波研究会学生研究発表会  
「基板裏面開口による超広帯域平面アンテナの動作原理」[12]
- (2) 2015 年 3 月（予定） 電子情報通信学会 総合大会  
「平面アンテナ広帯域特性の基板裏面開口構造依存性について」[13]

## 参考文献

- [1] V. H. Rumsey, "Frequency Independent Antennas," P.61, Academic Press, New York, 1966.
- [2] W. L. Barrow, L. J. Chu, J. J. Jansen, "Biconical Electromagnetic Horns," Proceedings IRE, Vol.27, p.769, 1939.
- [3] L. Paulsen, J. B. West, W. F. Perger, J. D. Kraus, "Recent Investigations on the Volcano Smoke Antenna," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 3, PP.845-848, June 2003.
- [4] 堀 俊和, "超広帯域アンテナとその帯域限界," 2006 信学ソ大, B-1-5, Sep. 2006.
- [5] 飴谷 充隆, 山本 学, 野島 俊雄, 伊藤 精彦, "自己補対放射素子を用いたマイクロストリップ給電広帯域プリントダイポールアンテナ," 電子情報通信学会論文誌. B, 通信 J88-B(9), PP.1662-1673, Sep. 2009.
- [6] 岩木 孝憲, 斉藤 昭, 本城 和彦, "平衡モードインピーダンス整合回路を備えた小型 UWB アンテナの特性," 2004 信学総大, B-1-71, March 2004.
- [7] 倉本 晶夫, "平面型の UWB アンテナ", NEC 技報, 58-2, PP.68-73, March 2005.
- [8] 柳 政宏, 倉島 茂美, 有田 隆, 小林 岳彦, "プリント基板上に形成した UWB モノポールアンテナ," 2004 信学ソ大, AS-4-30, Sept. 2004, <http://www.fcl.fujitsu.com/downloads/services/others/antenna.pdf>



- [9] 遠藤 亮, 堀 俊和, 藤元 美俊, “広帯域板状ループアンテナの内部窓形状が帯域特性に及ぼす影響,” 2009 信学技報, AP-108-386, PP.129-132, Jan. 2009.
- [10] 李 可人, 金指 有昌, Chenadec David L., 矢加部 利幸, 原田 博司, “裏面グランド窓付き広帯域平面アンテナ,” 2010 信学ソ大, B-1-183, Aug. 2010.
- [11] 金指 有昌, 李 可人, 原田 博司, 矢加部 利幸, “裏面窓付き平面アンテナの広帯域化についての検討,” 2011 信学総大, B-1-105, Feb. 2011.
- [12] 塚本 寛也, 矢加部 利幸, 李 可人, “基板裏面開口による超広帯域平面アンテナの動作原理,” 2014 信学技報, MW-114-376, PP.25-30, Dec. 2014.
- [13] 李 可人, 塚本 寛也, 矢加部 利幸, “平面アンテナ広帯域特性の基板裏面開口構造依存性について,” 2015 信学総大, (発表予定)

# 謝辞

情報通信研究機構において、研究指導を賜りました李可人主任研究員に深く感謝いたします。親身に指導して下さった事を感謝しています。

情報通信研究機構内での手続き等をして下さったアシスタントの有村様には感謝しております。

技術的なことや研究に関する心構えなど、様々なことをご指導して頂いた高研究員および清田様に感謝致します。

電気通信大学、矢加部利幸准教授に深く感謝致します。

最後に、修士課程を終えるにあたり両親や支えて下さった親族の皆様に深く感謝致します。